

**TUGAS AKHIR**

**KAPASITAS LENTUR**

**BALOK BETON PRATEGANG POST TENSION**

**DENGAN GROUTING PADA PASCA RETAK**

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia  
untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh  
derajat Sarjana Teknik Sipil



Disusun Oleh :

**R. AL AMIN EKO LEGOWO**

No. Mhs. : 91 310 022

NIRM : 910051013114120022

**MUCHAMAD IMRON**

No. Mhs. : 91 310 056

NIRM : 910051013114120054

**JURUSAN TEKNIK SIPIL**  
**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**  
**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**  
**YOGYAKARTA**

**1996**

**TUGAS AKHIR**  
**KAPASITAS LENTUR**  
**BALOK BETON PRATEGANG POST TENSION**  
**DENGAN GROUTING PADA PASCA RETAK**

Disusun Oleh :

Nama : R. Al Amin Eko Legowo  
No.mhs. : 91 310 022  
Nirm : 910051013114120022

Nama : Muchamad Imron  
No.Mhs. : 91 310 056  
Nirm : 910051013114120054

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Ir. H. Susastrawan, MS.  
Dosen Pembimbing I

Ir. Abdul Kadir Aboe, MS.  
Dosen Pembimbing II

Tanggal

Tanggal :

2/11/96

## MOTTO

SABAR ....TABAHA....DAN TAWAKAL  
ADALAH KUNCI KEBERHASILAN

## PERSEMBAHAN

*Dengan perasaan bahagia berkat limpahan karunia-Nya  
Kupersembahkan Laporan Tugas Akhir ini kepada  
Ayah dan Ibuku tercinta  
serta kakak dan adik tersayang  
yang telah memberikan dorongan semangat*

## ABSTRAKSI

Semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi dalam perencanaan elemen lentur beton prategang, khususnya perencanaan balok, dituntut untuk menghasilkan desain-desain balok yang ekonomis dan mempunyai kemampulayanan yang tinggi. Dengan demikian analisa tegangan-regangan sangat dibutuhkan pada bahan penyusunnya.

Beberapa metode dapat digunakan untuk menganalisa tegangan-regangan penampang pada keadaan ultimit. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode kompatibilitas regangan yang didasarkan atas regangan-regangan penampang yang diprediksikan akan terjadi pada keadaan-keadaan tertentu, seperti dekompresi pada posisi tendon, retak serat tarik, dan tercapainya komponen-komponen penyusun, baik pada beton maupun bajanya. Dengan menganalisa regangan-regangan pada penampang, dapat diketahui kapasitas penampang dalam memberikan reaksi perlawanan terhadap beban kerja.

Akibat terjadinya retak maka letak garis netral penampang akan bergerak kearah bidang desak. Pada keadaan tersebut baik beton maupun bajanya akan mengembangkan kapasitasnya sampai mendekati batas ultimit. Dengan demikian kapasitas penampang balok tergantung pada kekuatan kedua bahan tersebut serta dimensi tampangnya. Setelah terjadi retak, struktur masih bisa menambah momen yang lebih besar dari pada saat terjadi retak, dan terus bertambah sampai kekuatan bahan mencapai kekuatan ultimit. Untuk itu dalam perencanaan harus memperhatikan batas elastis dan ultimit pada kedua jenis bahan, sehingga dalam perencanaan selanjutnya dapat memberikan desain tampang yang ekonomis dan mempunyai kemampuan yang tinggi.

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum.Wr.Wb

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah swt. yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada seluruh makhluk ciptaan-Nya. Salam dan sholawat ditujukan kepada nabi Muhammad saw. yang telah membawa manusia ke jalan yang diridloi Allah swt.

Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu dalam persyaratan dalam menyelesaikan jenjang sarjana teknik sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Tidak sedikit kendala yang kami alami baik dalam mencari permasalahan, sumber tulisan, maupun dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir itu sendiri. Sehingga setelah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini, kami merasa berbahagia, karena ada sesuatu yang kami dapatkan.

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, kami mendapat bimbingan serta pengarahan dari beberapa pihak. Oleh sebab itu kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Ucapan terima kasih ini kami tujukan kepada :

1. Bapak Ir. H. Susastrawan, MS, selaku dosen pembimbing I dan dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Ir. Bambang Sulistiono, MSCE, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Tadjudin, MS, selaku Koordinator Tugas Akhir, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam indonesia.
4. Bapak Ir. A Kadir Aboe, MS, selaku dosen pembimbing II.

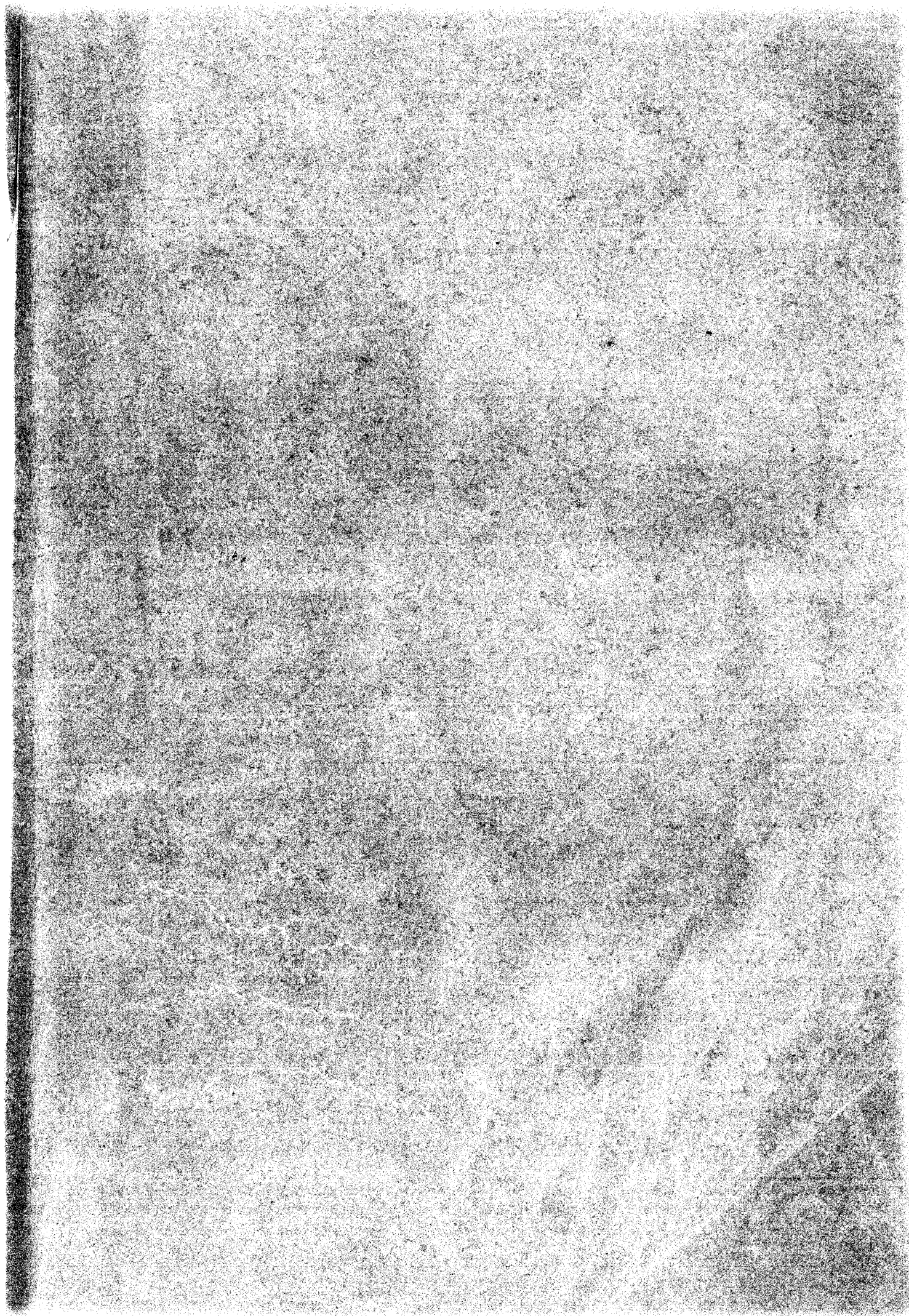
5. Orang tua dan keluarga kami, yang telah memberikan dukungan baik material dan spiritual.
6. Semua pihak yang telah membantu hingga terselesainya laporan tugas akhir ini, yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu.

Kami menyadari dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini, tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan, untuk itu kami mengharapkan saran yang bersifat membantu pengembangan permasalahan dalam Laporan Tugas Akhir sebagai masukan, sehingga menjadi lebih baik.

Akhirnya kami berharap semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat sesuatu yang bermanfaat bagi semua pihak yang tertarik dan ingin mempelajari Beton Prategang.

Yogyakarta, September 1996

Penyusun



## DAFTAR ISI

|                                                                                        |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Halaman Judul .....                                                                    | i        |
| Halaman Pengesahan .....                                                               | ii       |
| Halaman Motto dan Persembahan .....                                                    | iii      |
| Abstraksi .....                                                                        | iv       |
| Kata Pengantar .....                                                                   | v        |
| Daftar Isi .....                                                                       | vii      |
| Daftar Notasi .....                                                                    | x        |
| Daftar Tabel .....                                                                     | xiii     |
| Daftar Gambar .....                                                                    | xiv      |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                                                         | <b>1</b> |
| 1.1 Latar Belakang Masalah .....                                                       | 1        |
| 1.2 Rumusan dan Batasan Masalah .....                                                  | 3        |
| 1.2.1 Rumusan Masalah .. .....                                                         | 3        |
| 1.2.2 Batasan Masalah .....                                                            | 3        |
| 1.3 Tujuan dan Manfaat .....                                                           | 4        |
| 1.3.1 Tujuan .....                                                                     | 4        |
| 1.3.2 Manfaat .....                                                                    | 5        |
| 1.4 Tinjauan Pustaka .....                                                             | 5        |
| 1.5 Metode Analisis .....                                                              | 6        |
| 1.5.1 Menetapkan Metode Analisis.....                                                  | 6        |
| 1.5.2 Memahami Karakteristik Bahan dan Perilakunya<br>serta Rumus yang Digunakan ..... | 6        |
| 1.5.3 Analisis Hitungan .....                                                          | 6        |
| 1.5.4 Pengambilan Kesimpulan .....                                                     | 7        |
| 1.5.5 Saran .....                                                                      | 7        |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>BAB II KARAKTERISTIK BAHAN .....</b>           | <b>8</b>  |
| 2.1 Elemen Lentur .....                           | 8         |
| 2.2 Bahan Struktur Beton Prategang .....          | 8         |
| 2.2.1 Kekuatan Beton .....                        | 9         |
| 2.2.2 Modulus Elastis Beton .....                 | 11        |
| 2.2.3 Karakteristik Tegangan-regangan Beton ..... | 12        |
| 2.2.4 Baja Bermutu Tinggi .....                   | 13        |
| 2.2.5 Karakteristik Tegangan-regangan Baja .....  | 14        |
| <b>BAB III KEHILANGAN GAYA PRATEGANG .....</b>    | <b>16</b> |
| 3.1 Kehilangan Gaya Prategang .....               | 16        |
| 3.1.1 Akibat Deformasi Elastis Beton .....        | 17        |
| 3.1.2 Akibat Rangkak Beton .....                  | 20        |
| 3.1.3 Akibat Susut Beton .....                    | 21        |
| 3.1.4 Akibat Relaksasi Baja .....                 | 23        |
| 3.1.5 Akibat Gesekan .....                        | 25        |
| 3.1.6 Akibat Slip Angkur .....                    | 31        |
| <b>BAB IV KEKUATAN PENAMPANG BALOK TERHADAP</b>   |           |
| <b>    LENTUR .....</b>                           | <b>32</b> |
| 4.1 Sistem Prategang Sebagian .....               | 32        |
| 4.2 Tahapan Pembebanan .....                      | 33        |
| 4.3 Metode Kompatibilitas Regangan .....          | 36        |
| 4.4 Retak Lentur .....                            | 41        |
| <b>BAB V ANALISIS HITUNGAN .....</b>              | <b>44</b> |
| 5.1 Tanpa Tulangan Non-prategang .....            | 44        |
| 5.2 Dengan Tulangan Non-prategang .....           | 54        |
| <b>BAB VI PEMBAHASAN .....</b>                    | <b>64</b> |
| 6.1 Hasil Analisis Hitungan .....                 | 64        |
| 6.2 Momen Tambahan .....                          | 66        |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN ..... | 68 |
| 7.1 Kesimpulan .....               | 68 |
| 7.2 Saran .....                    | 68 |
| Penutup                            |    |
| Daftar Pustaka                     |    |

## DAFTAR NOTASI

### HURUF LATIN

|                  |                                                              |
|------------------|--------------------------------------------------------------|
| A                | = luas penampang                                             |
| A <sub>c</sub>   | = luas penampang netto beton                                 |
| A <sub>ps</sub>  | = luasan baja prategang                                      |
| A <sub>s</sub>   | = luasan baja non-prategang pada daerah tarik                |
| A <sub>s</sub> ' | = luasan baja non-prategang pada daerah tekan                |
| A <sub>t</sub>   | = luas penampang beton transformasi                          |
| b                | = lebar penampang tekan                                      |
| b <sub>w</sub>   | = lebar badan                                                |
| C                | = gaya tekan internal                                        |
| c                | = tebal selimut beton                                        |
| c                | = jarak serat luar tekan beton ke garis netral               |
| C <sub>a</sub>   | = jarak serat atas beton ke garis netral                     |
| C <sub>b</sub>   | = jarak serat bawah beton ke garis netral                    |
| C <sub>c</sub>   | = gaya tekan internal akibat beton                           |
| C <sub>s</sub>   | = gaya tekan internal akibat baja                            |
| d                | = kedalaman efektif penampang                                |
| d'               | = jarak dari cgs ke serat tarik terluar                      |
| e                | = eksentrisitas tendon                                       |
| E <sub>c</sub>   | = modulus elastisitas beton                                  |
| E <sub>ci</sub>  | = modulus elastisitas beton saat transfer                    |
| E <sub>ps</sub>  | = modulus elastisitas baja prategang                         |
| E <sub>s</sub>   | = modulus elastisitas baja non-prategang                     |
| f <sub>b</sub>   | = tegangan serat ekstrem bawah                               |
| f <sub>c</sub>   | = tegangan satuan pada beton                                 |
| f'c              | = tegangan satuan batas untuk beton umur 28 hari             |
| f'ci             | = tegangan satuan batas untuk beton pada saat transfer       |
| f <sub>cs</sub>  | = tegangan beton di posisi tendon saat transfer              |
| f <sub>csd</sub> | = tegangan beton di posisi tendon akibat beban mati tambahan |
| f <sub>pe</sub>  | = tegangan baja efektif                                      |
| f <sub>pi</sub>  | = tegangan baja setelah grouting                             |
| f <sub>pj</sub>  | = tegangan baja setelah transfer                             |
| f'pi             | = tegangan baja tereduksi setelah grouting                   |
| f <sub>ps</sub>  | = tegangan satuan pada baja                                  |
| f <sub>pu</sub>  | = tegangan tarik ultimite baja prategang                     |
| f <sub>py</sub>  | = tegangan leleh baja prategang                              |
| f <sub>s</sub>   | = tegangan satuan baja non-prategang                         |
| f <sub>y</sub>   | = tegangan leleh baja non-prategang                          |
| f <sub>ti</sub>  | = tegangan tarik serat ekstrim saat transfer                 |

|          |                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------|
| $h$      | = tinggi penampang                                       |
| $h_f$    | = tebal sayap tekan beton                                |
| $I$      | = momen inersia penampang                                |
| $k$      | = koefisien woobble                                      |
| $k_{cr}$ | = koefisien rangkai                                      |
| $k_{sh}$ | = koefisien susut                                        |
| $L$      | = panjang bentang                                        |
| $m$      | = panjang sisi depan sudut simpangan kelengkungan tendon |
| $M_o$    | = momen akibat berat sendiri                             |
| $M_r$    | = momen saat retak                                       |
| $M_n$    | = momen nominal                                          |
| $M_u$    | = momen ultimit                                          |
| $n$      | = rasio modulus $E_{ps}/E_c$                             |
| $n_i$    | = rasio modulus $E_{ps}/E_{ci}$                          |
| $n_s$    | = rasio modulus $E_s/E_c$                                |
| $P$      | = gaya prategang                                         |
| $P_e$    | = gaya prategang efektif                                 |
| $P_i$    | = gaya prategang awal sesaat setelah grouting            |
| $P_j$    | = gaya prategang awal sesaat setelah transfer            |
| $q$      | = beban merata                                           |
| $r$      | = radius gyrasi $I/A$                                    |
| $RH$     | = kelembaban relatif                                     |
| $S_a$    | = tahanan momen atas                                     |
| $S_b$    | = tahanan momen bawah                                    |
| $T$      | = gaya tarik internal                                    |
| $T_s$    | = gaya tarik internal akibat baja                        |
| $V$      | = volume penampang persatuan panjang elemen              |
| $w$      | = lebar retak                                            |
| $y$      | = simpangan kelengkungan tendon                          |

#### huruf Yunani

|                 |                                                                  |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| $\Delta a$      | = deformasi akibat ankur                                         |
| $\Delta f$      | = perubahan tegangan                                             |
| $\Delta_{ES}$   | = deformasi elastis beton                                        |
| $\Delta f_p$    | = perubahan tegangan akibat kehilangan prategang                 |
| $\delta P$      | = perubahan gaya prategang                                       |
| $\delta x$      | = perubahan panjang elemen                                       |
| $\alpha$        | = sudut                                                          |
| $\alpha, \beta$ | = konstanta tegangan beton                                       |
| $\epsilon_{ps}$ | = regangan satuan baja prategang                                 |
| $\epsilon_1$    | = regangan satuan efektif pada baja prategang pada posisi tendon |

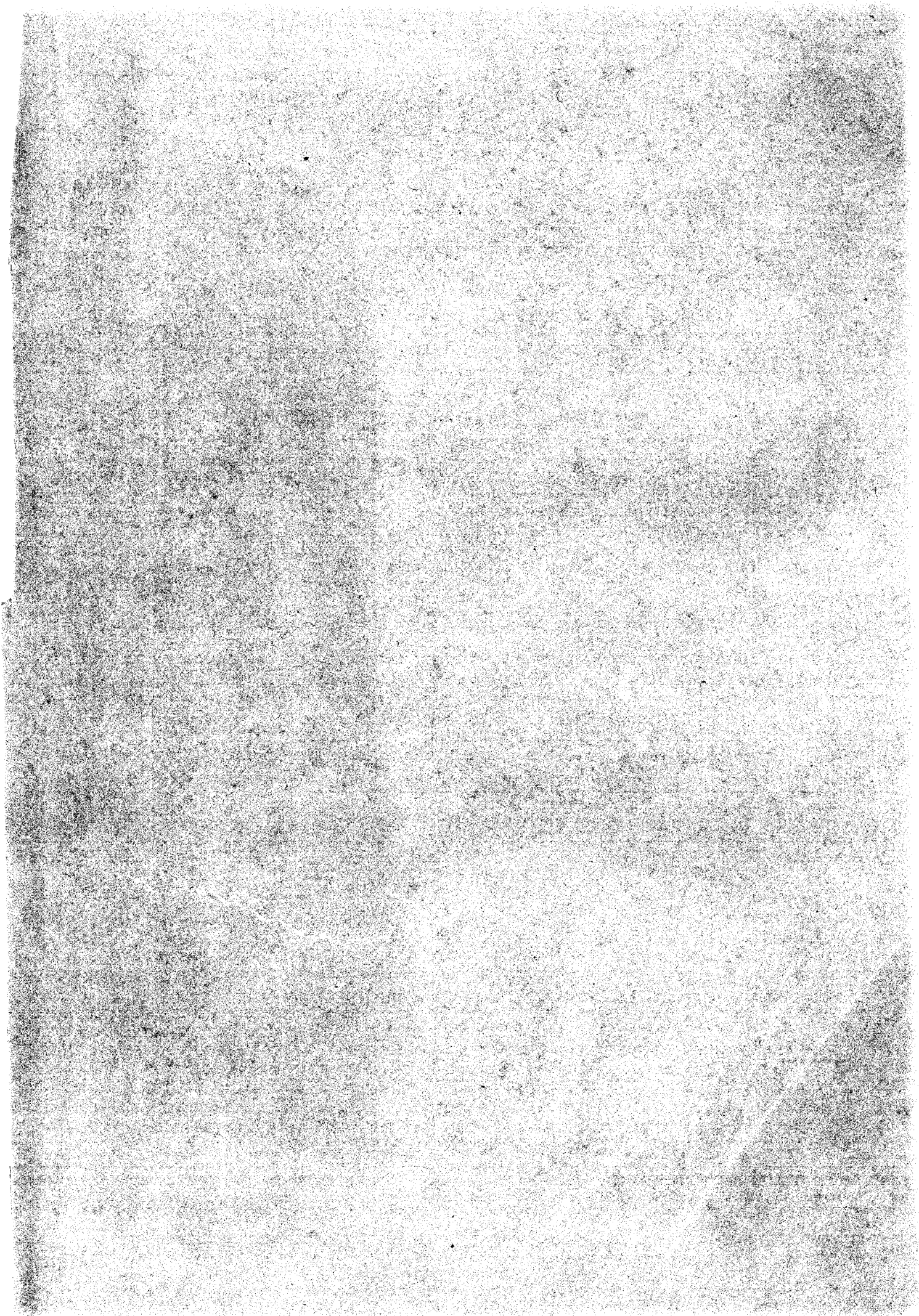
- $\epsilon_2$  = regangan satuan akibat dekompresi beton pada posisi tendon  
 $\epsilon_3$  = regangan satuan pada saat layan pada posisi tendon  
 $\epsilon_b$  = regangan beton pada posisi serat tarik  
 $\mu$  = koefisien kelengkungan  
 $\gamma_p$  = faktor jenis tendon prategang  
 $\rho$  = rasio tulangan

## DAFTAR TABEL

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2-1 Nilai Koefisien $\alpha$ dan $\beta$ .....      | 11 |
| Tabel 3-1 Nilai $K_{sh}$ untuk Elemen Pascatarik .....    | 23 |
| Tabel 3-2 Koefisien Gesekan untuk Tendon Pascatarik ..... | 27 |
| Tabel 4-1 Tegangan-tegangan Ijin Batang Lentur .....      | 35 |
| Tabel 6-1 Kapasitas Momen Ultimate .....                  | 65 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1.1 Pola retak yang khas pada balok dengan rekatan dan tanpa rekatan .....                                                                  | 2  |
| Gambar 1.2 Kurva tegangan desak beton terhadap waktu .....                                                                                         | 11 |
| Gambar 2.2 Kurva tegangan-regangan beton normal .....                                                                                              | 12 |
| Gambar 2.3 Kurva tegangan-regangan baja .....                                                                                                      | 15 |
| Gambar 3.1 Deformasi beton akibat tendon kosentris .....                                                                                           | 17 |
| Gambar 3.2 Elemen prategang eksentris .....                                                                                                        | 18 |
| Gambar 3.3 Kurva kehilangan tegangan terhadap waktu untuk kawat stres relieved pada 70% fpu dan dijaga pada panjang konstan dengan suhu 85 F ..... | 24 |
| Gambar 3.4 Gesekan dalam elemen lentur prategang .....                                                                                             | 28 |
| Gambar 3.5 Pendekatan untuk menetapkan sudut pusat suatu tendon melengkung .....                                                                   | 30 |
| Gambar 4.1 Cara pengangkatan balok sederhana .....                                                                                                 | 34 |
| Gambar 4.2 Diagram regangan pada penampang balok prategang sampai mencapai keruntuhan .....                                                        | 36 |
| Gambar 5.1 Diagram regangan tendon saat leleh (0,85%) tanpa tulangan non-prategang .....                                                           | 51 |
| Gambar 5.2 Diagram regangan tendon 5,5% tanpa tulangan non-prategang .....                                                                         | 52 |
| Gambar 5.3 Diagram regangan tendon saat leleh (0,85%) dengan tulangan non-prategang.....                                                           | 61 |
| Gambar 5.4 Diagram regangan tendon 5,5 % dengan tulangan non-prategang .....                                                                       | 62 |



# **BAB I**

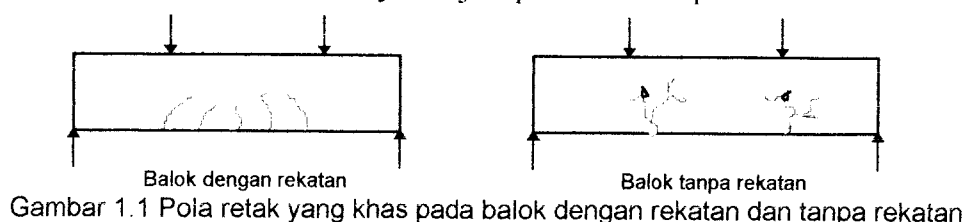
## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Saat ini struktur beton prategang pada kondisi-kondisi tertentu menjadi alternatif yang menguntungkan dibanding jenis struktur beton lainnya, karena mempunyai beberapa kelebihan. Tuntutan untuk kebutuhan dan penggunaan ruang secara efektif, kontrol lendutan maupun retak yang baik, merupakan kelebihan jenis struktur ini. Selain itu kelebihan lainnya ialah : jenis struktur ini dapat dilaksanakan disaat jenis yang lain sudah tidak dapat digunakan karena alasan teknis maupun ekonomis. Dengan memperhatikan hal - hal tersebut, maka beton prategang merupakan satu alternatif yang menarik untuk dikaji tentang kapasitasnya, sehingga memberikan hasil yang bermanfaat dari studi lebih lanjut tentang struktur jenis ini.

Dalam perencanaan suatu elemen struktur, dituntut untuk mengetahui batas kemampuan struktur secara maksimal dalam menahan beban, sehingga akan memberikan batasan besarnya beban yang bekerja pada struktur tersebut. Dalam hal kemampulayanan, lendutan dan retak merupakan bagian parameter yang perlu diperhatikan, disamping analisis besarnya kapasitas lentur. Akibat momen lentur yang besar, balok memberikan reaksi perlawanan maksimal, dan pada kondisi ini komponen penyusunnya mengalami regangan plastis yang mempengaruhi perilakunya. Memperhatikan hal tersebut, maka diperlukan analisis balok untuk mengetahui kapasitas lentur maupun kemampulayanannya dalam memikul beban.

Ada dua cara yang dipakai pada analisis dan perencanaan beton prategang yaitu dengan tendon terekat (*bounded*) dan tidak terekat (*unbounded*), dan keduanya mempunyai perilaku yang berbeda. Pada beton prategang dengan tendon terekat, tegangan baja prategang tidak sama di sepanjang bentang balok, hal ini disebabkan adanya rekatan antara baja dan beton. Sedangkan pada prategang dengan tendon tidak terekat, tegangan baja prategang disepanjang bentang balok hampir sama, karena baja bisa bergerak bebas saat menerima beban. Tingkat kenaikan tegangan baja dengan rekatan lebih besar dibanding balok tanpa rekatan, pada tahap sebelum dan sesudah retak, dan setelah terjadi retak, tegangan baja meningkat dengan laju lebih cepat pada kedua tipe tersebut dibanding sebelum retak. Balok tanpa rekatan tidak mencapai kekuatan ultimit, maka beban maksimum yang dipikul oleh balok itu lebih kecil daripada balok dengan rekatan, dimana pada balok dengan rekatan, baja mencapai kekuatan ultimitnya. Pada tahap setelah retak balok dengan rekatan ditandai dengan terjadinya retak-retak halus yang terbagi merata dalam daerah momen yang lebih besar atau daerah yang lemah, tetapi pada balok tanpa rekatan hanya menimbulkan sedikit retak yang terletak pada daerah yang lebih lemah dan lebar retaknya lebih besar dibanding dengan balok rekatan. Pola retakan pada kedua tipe balok dilukiskan pada gambar 1.1. Pada umumnya balok dengan rekatan lebih disukai karena kekuatan lenturnya lebih tinggi serta karakteristik deformasinya dapat diramalkan. Oleh karena pada balok prategang tidak terekat retaknya lebih besar, maka pengaruh korosi bajanya lebih besar, apalagi jika retak terjadi pada penampang batang hingga tendon teroksidasi oleh udara luar. Karena alasan - alasan tersebut prategang dengan tendon terekat lebih banyak dijumpai di dalam praktek.



Gambar 1.1 Pola retak yang khas pada balok dengan rekatan dan tanpa rekatan

Terjadinya retak pada elemen struktur merupakan salah satu indikasi bahwa suatu struktur sudah berkurang kekuatannya dalam menahan beban tambahan. Pada beton prategang, retak - retak rambut akibat beban berlebihan yang terjadi sesaat akan hilang jika beban tersebut berkurang. Bila hal ini terulang pada beban yang sedikit lebih kecil dari beban yang mengakibatkan retak, maka retak - retak sudah mulai terlihat. Atas dasar tersebut sangat perlu untuk mengetahui kemampuan balok dalam menahan beban yang menyebabkan retak, tetapi retak - retak yang ditimbulkan merupakan salah satu faktor penentu akan runtuhnya suatu struktur. Oleh karena itu analisis lentur merupakan rangkaian penting dalam perencanaan suatu balok.

## **1.2 RUMUSAN DAN BATASAN MASALAH**

### **1.2.1 Rumusan masalah**

Balok beton prategang yang belum mengalami retak, maka tampang balok tersebut akan bekerja untuk mengimbangi gaya - gaya eksternal yang terjadi. Setelah balok mengalami retak, maka penampang balok akan mengalami pertambahan regangan pada daerah tarik yang mengakibatkan naiknya garis netral. Dengan demikian sangat dibutuhkan analisis untuk mengetahui kemampulayanan balok beton prategang pascatarik dengan grouting dalam mengimbangi gaya yang bekerja khususnya momen lentur setelah penampang mengalami retak.

### **1.2.2 Batasan masalah**

Untuk memperjelas analisis, dibuat beberapa batasan masalah sebagai berikut ini.

- a. Balok tampang T
- b. Beban yang diperhitungkan adalah beban statis gravitasi
- c. Tidak memperhitungkan geser dan puntir.
- d. Kapasitas lentur yang diperhitungkan ialah pada dan pasca retak

Sedangkan untuk memudahkan dalam analisa dibuat beberapa anggapan sebagai berikut ini.

- a. Beton dianggap tidak menahan tarik.
- b. Perubahan regangan baja dan beton setelah rekatan adalah sama.
- c. Regangan maksimum untuk masing - masing komponen struktur :
  - baja prategang 5,5 %
  - beton 0,003
- d. Diagram regangan penampang linier.
- e. Pada penampang bersayap, perilaku tegangan daerah sayap sama dengan daerah badan.
- f. Tidak terjadi kerusakan bahan akibat transfer gaya prategang.
- g. Korosi yang mungkin terjadi pada tendon akibat penampang yang retak tidak memberikan pengaruh terhadap analisa tegangan, sehingga retakan yang terjadi secepat mungkin dilakukan perbaikan / injeksi.

### **1.3 TUJUAN DAN MANFAAT**

#### **1.3.1 Tujuan**

Setelah melakukan analisis kapasitas lentur balok beton prategang post tension dengan grouting, maka akan didapatkan tujuan antara lain :

- a. Mengetahui karakteristik dan perilaku bahan balok prategang yang terbebani dan hubungannya dengan retak.
- b. Membandingkan pengaruh tulangan non-prategang dalam hubungannya dengan kapasitas lentur.
- c. Mengetahui besarnya kapasitas balok dalam menerima momen lentur pada saat terjadi retak dan momen lentur tambahan sampai terjadi tegangan ultimit.

### 1.3.2 Manfaat

Analisis lentur berhubungan dengan proses perencanaan sebagai pertimbangan dalam perencanaan selanjutnya. Karena dengan melaksanakan analisis lentur, akan didapatkan beban batas yang menyebabkan retak, dimana retak lentur merupakan salah satu indikasi terhadap keruntuhan struktur. Dengan analisis yang dilakukan maka akan mendapatkan manfaat antara lain:

- a. Akan dapat memberikan penyelesaian terhadap analisis tegangan - regangan pada balok beton prategang yang menahan momen lentur.
- b. Sebagai pertimbangan dalam desain struktur balok beton prategang.

## 1.4 TINJAUAN PUSTAKA

Dalam suatu perencanaan batang-batang prategang yang digunakan dalam struktur khusus, perlu untuk menghitung beban yang menyebabkan retak pada sayap tarik, agar terjamin keamanan akibat retak. Sehubungan dengan itu, perencanaan elastis dapat digunakan dalam perhitungan beban retak dengan menetapkan suatu beban yang menghasilkan tegangan tarik di dalam sayap tarik, yang mana sama dengan kekuatan tarik beton. Hal ini lazim untuk mengasumsikan kekuatan lentur tarik beton sama dengan modulus retak beton pada perhitungan beban retak. (*JAMES R. LIBBY; 1984*)

Momen yang menghasilkan retak-retak rambut pertama pada balok beton prategang dihitung dengan teori elastik, dengan menganggap bahwa retak mulai terjadi saat tegangan tarik pada serat terluar beton mencapai modulus keruntuhannya. Harus diperhatikan fakta modulus keruntuhan hanyalah merupakan ukuran permulaan retak-retak rambut yang sering kali tidak terlihat oleh mata telanjang. Tegangan tarik yang lebih tinggi dari modulus runtuh dapat menghasilkan retak-retak yang terlihat. Pada bagian lain, jika beton telah retak sebelumnya oleh beban berlebihan, susut, atau sebab-sebab yang lain,

retak-retak dapat terlihat kembali pada tegangan tarik yang lebih kecil (*T.Y.LIN;1988*)

Tingkat kenaikan tegangan pada tendon prategang akibat beban tergantung pada derajat rekatan antara baja mutu tinggi dengan beton sekelilingnya. Pada beton prategang dengan rekatan (*bonded*) untuk elemen pratarik atau elemen pascatarik yang digrouting, maka aksi gabungan antara baja dan beton berlaku dan tegangan pada baja dihitung dengan memakai teori penampang komposit sampai pada tahap retak. Setelah terjadi retak tegangan pada baja meningkat dengan laju yang lebih cepat dibandingkan sebelum terjadi retak. ( *N. KRISNA RAJU; 1986* )

## **1.5 METODE ANALISIS**

### **1.5.1 Menetapkan metode analisis**

Metode analisis yang dipakai disesuaikan dengan tinjauan yang akan dianalisis dan tujuan yang akan dicapai. Pada analisa lentur balok prategang pascatarik tendon terekat pasca retak dipakai metode kompatibilitas regangan, sehingga sesuai dengan apa yang akan ditinjau dan disimpulkan dalam analisa kapasitas lentur balok tersebut.

### **1.5.2 Memahami karakteristik bahan dan perilakunya serta rumus yang akan digunakan.**

Sebelum menganalisa suatu penampang pemahaman rumus dasar yang digunakan harus sesuai dengan metode analisis yang dipakai. Karakteristik bahan seperti mutu beton, baja, kondisi tendon dan besaran-besaran seperti luas tampang, panjang bentang, modulus elastis, dan besaran lainnya sangat mendukung dalam melakukan analisis.

### **1.5.3 Analisis hitungan**

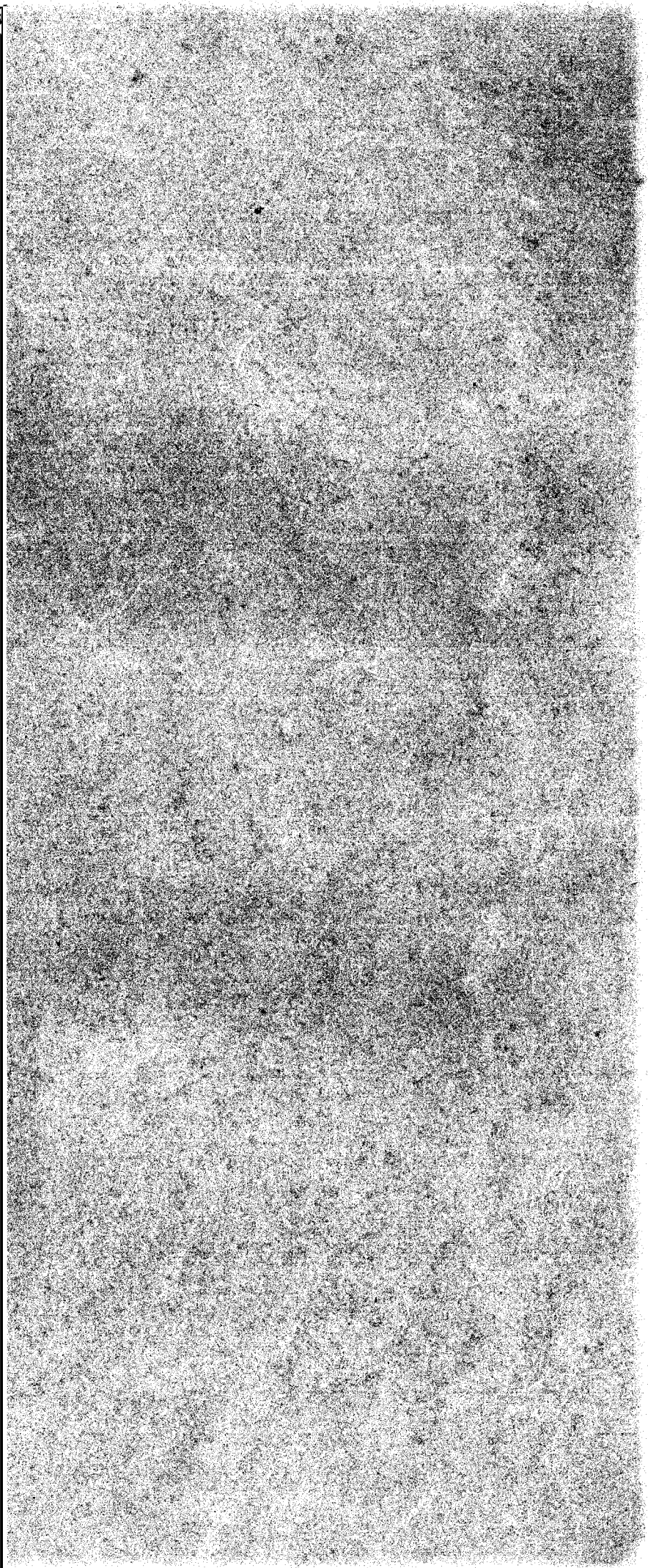
Setelah memenuhi kriteria untuk hitungan dilakukan analisis balok beton prategang sesuai dengan metode, besaran, dan karakteristik bahan yang dipakai sehingga didapatkan hasil yang diinginkan.

### **1.5.4 Pengambilan kesimpulan**

Dari hasil analisis tersebut dapat diambil kesimpulan mengenai kapasitas lentur balok beton prategang pascatarik dengan grouting setelah terjadinya retak, sehingga dapat diketahui kemampulayanan balok beton prategang pada kondisi yang ada.

### **1.5.5 Saran**

Dari hasil kesimpulan yang didapat, diharapkan dapat memberi gambaran dan pertimbangan dalam merencanakan suatu elemen struktur, sehingga didapatkan dimensi yang ekonomis dan penggunaan bahan secara optimal. Dengan demikian dihasilkan elemen struktur berkekuatan tinggi dan sesuai dengan dimensi yang diinginkan



## **BAB II**

### **KARAKTERISTIK BAHAN**

#### **2.1 Elemen Lentur**

Balok beton prategang merupakan suatu elemen lentur dirancang untuk memikul beban utama yang bekerja berupa momen lentur. Untuk hal seperti ini, peninjauan terhadap kombinasi beban yang bekerja sangat diperlukan untuk mengetahui perilakunya, sehingga akan didapatkan jaminan keamanan terhadap kemampulayanan struktur.

Kapasitas lentur suatu elemen struktur beton prategang tergantung pada beberapa parameter pokok antara lain daya rekat antara tendon dengan beton, kuat tekan beton, prosentase tulangan pada penampang, dan kuat tarik ultimit tendon. Besarnya lendutan dan retak akibat lenturan dapat diperhitungkan sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi keamanan struktur. Karena adanya retak pada beton prategang, maka dapat mengakibatkan korosi pada bajanya, karena baja mutu tinggi lebih sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan sekitar. Dilain pihak lendutan yang besar mengakibatkan tegangan yang besar hingga dapat mempengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan.

#### **2.2 Bahan Struktur Beton Prategang**

Bahan yang dipakai untuk beton prategang disyaratkan menggunakan mutu tinggi. Hal ini disebabkan elemen struktur beton prategang memikul gaya prategang dan beban yang pada umumnya lebih besar dibandingkan dengan beton bertulang. Pada balok beton prategang yang ditumpu pada kedua

ujungnya, serat atas tertekan oleh beban eksternal, dan serat bawah tertekan pada saat transfer gaya prategang. Pada bagian tengah bentang akan menahan momen lentur yang besar, sedangkan pada kedua ujungnya menahan serta mendistribusikan gaya prategang. Pada balok prategang juga diperlukan baja dengan kekuatan tinggi untuk mendapatkan tegangan tarik yang tinggi. Dengan demikian bahan-bahan tersebut dapat mengimbangi beban eksternal yang bekerja, dan menahan tekanan akibat penarikan pada ujung balok, serta dapat mengurangi reduksi tegangan akibat perilaku beton yang merugikan seperti rangkai dan susut. Berdasarkan aspek-aspek teknis tersebut, maka penggunaan bahan kekuatan tinggi untuk pekerjaan beton prategang sangat dianjurkan, sehingga memungkinkan untuk perancangan suatu elemen struktur dengan bentang panjang.

### **2.2.1 Kekuatan Beton**

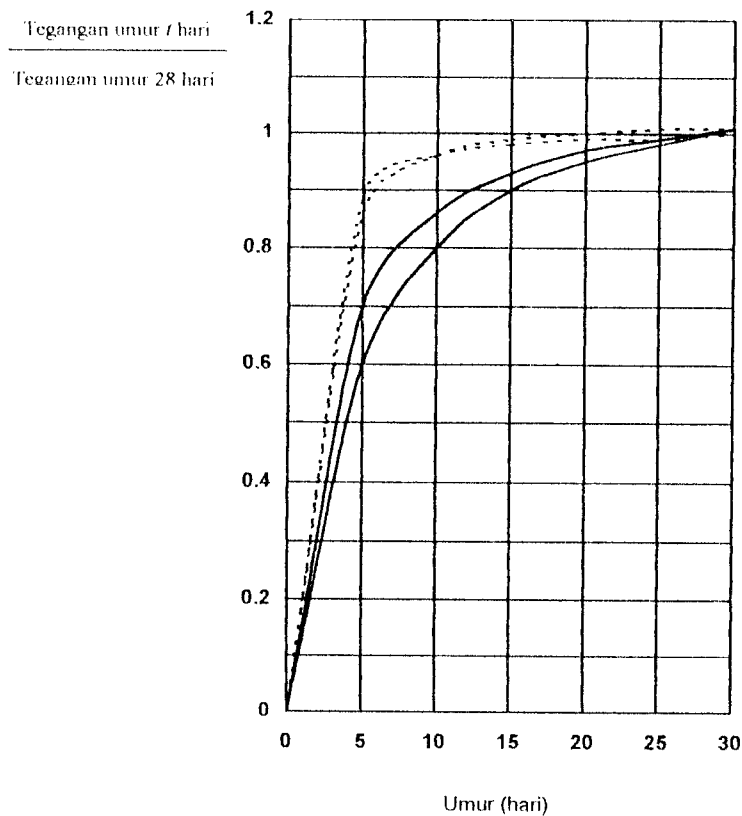
Karena adanya gaya besar yang bekerja pada elemen struktur balok prategang, maka dituntut penggunaan beton yang memenuhi syarat kekuatan. Pemakaian beton mutu tinggi akan menghasilkan dimensi penampang yang lebih kecil, dengan demikian akan menghasilkan berat sendiri yang kecil juga. Beton mutu tinggi memberikan ketahanan yang tinggi terhadap tarikan, geseran, rekatan, dan kekuatan pada daerah ujung bentang. Hal ini merupakan tuntutan struktur beton prategang yang mengalami tegangan tinggi. Pada beton prategang pascatarik, saat pengangkutan akan lebih menguntungkan dengan menggunakan beton mutu tinggi, karena bila menggunakan beton mutu rendah akan mempersulit pelaksanaan pekerjaan karena akan memerlukan pengangkutan khusus. Faktor lain adalah beton mutu tinggi mempunyai modulus elastis yang lebih tinggi dibandingkan beton mutu rendah, sehingga kehilangan gaya prategang akibat deformasi elastis dan rangkai beton akan lebih kecil. Selain itu, beton mutu tinggi tersebut mempunyai kekuatan desak

tinggi dan mempunyai kekuatan tarik yang tinggi pula dan mempunyai ketahanan yang lebih besar terhadap retak lentur maupun retak tarik diagonal.

Dalam praktek kekuatan desak silinder beton pada umur 28 hari antara 28 sampai 55 mpa umumnya digunakan untuk batang beton prategang, walaupun kekuatan lebih tinggi telah digunakan. Untuk memperolehnya dapat dibuat dari campuran normal dengan rasio air / semen rendah dan penggetaran yang seksama. Namun untuk mendapatkan kepastian dari mutu beton yang dihasilkan dapat dilakukan test laboratorium terhadap sampel mutu beton. Mutu beton yang dicapai di laboratorium harus lebih tinggi 10 sampai 20 % dari mutu beton yang disyaratkan dalam spesifikasi rancangan. Kekuatan beton bervariasi terhadap umur beton, kekuatan dicapai dengan cepat pada awalnya tetapi selanjutnya berkurang. Variasi kekuatan ini penting khususnya dalam desain dan fabrikasi batang - batang beton prategang, yang disebabkan oleh tarikan baja pada awal umur beton. Persamaan umum untuk memperkirakan kekuatan desak beton terhadap variasi umur beton adalah :

$$f'_{ct} = \frac{t}{\alpha + \beta t} f'_c \quad (2.1)$$

dimana  $f'_{ct}$  adalah kekuatan desak beton pada umur  $t$  hari,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah konstanta dan  $f'_c$  adalah kekuatan desak beton pada umur 28 hari. Nilai rata-rata dari  $\alpha$  dan  $\beta$  dapat dilihat pada tabel 2-1. Variasi kekuatan desak beton terhadap umur dari nilai yang diberikan pada tabel 2-1 dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Kurva tegangan desak beton terhadap waktu (LIBBY;1984)

Tabel 2-1 Nilai Koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  (LIBBY; 1984)

| perawatan beton | tipe semen | $\alpha$ | $\beta$ | kurva |
|-----------------|------------|----------|---------|-------|
| Basah           | I          | 4.00     | 0.85    | 1     |
| Basah           | III        | 2.30     | 0.92    | 2     |
| Uap             | I          | 1.00     | 0.95    | 3     |
| Uap             | III        | 0.70     | 0.98    | 4     |

sedangkan modulus retak beton dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

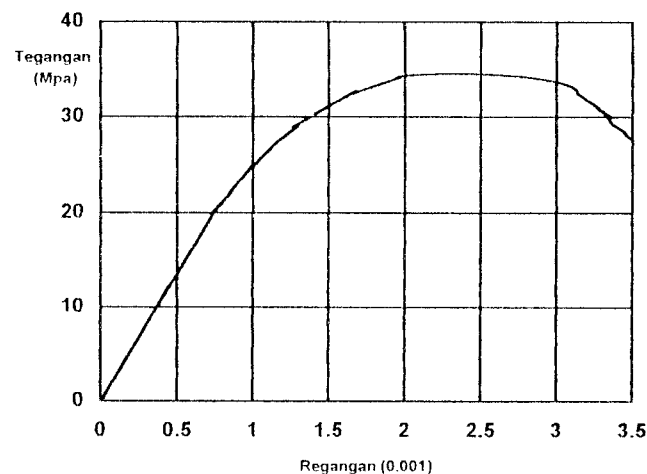
### 2.2.2 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas beton adalah gradien garis lurus pada bagian awal dari kurva tegangan-regangan, nilai ini lebih besar untuk beton dengan kekuatan tinggi, seperti terlihat pada gambar 2.2. Modulus elastisitas beton merupakan fungsi dari beberapa variabel, termasuk tipe dan jumlah bahan

yang digunakan baik dalam pembuatan maupun cara dan lamanya perawatan beton, umur pada saat pembebanan, laju pembebanan, dan faktor-faktor lain. Besarnya modulus elastisitas sangat penting bagi rancangan struktur beton prategang, sebab hal ini berkaitan dengan perilaku beton prategang pada lendutan dan kehilangan gaya prategang.

Pada keadaan normal besarnya modulus elastisitas beton dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_c = 4730\sqrt{f'_c} \quad (2.3)$$



Gambar 2.2 Kurva Tegangan Regangan Beton Normal (TY. LIN; 1988)

### 2.2.3 Karakteristik Tegangan-Regangan Beton

Pada umumnya, beton berfungsi untuk menahan tegangan desak baik pada elemen tekan seperti kolom, tiang, atau pondasi, maupun pada elemen lentur seperti pelat, balok, atau dinding. Pada beton prategang, penting untuk mengetahui karakteristik regangan dan tegangan, sebab hal itu berkaitan dalam memperkirakan besarnya kehilangan gaya prategang pada baja serta untuk memperhitungkan pengaruh-pengaruh lain dari deformasi beton. Karakteristik

deformasi dari pembebanan jangka pendek dan beban tetap berkaitan dengan perhitungan kekuatan lentur serta lendutan balok prategang.

Kurva tegangan-regangan dari beton dalam keadaan tertekan adalah tidak linier, namun untuk beban yang tidak melebihi 30 persen dari kekuatan pecah, perilaku deformasi beban dapat dianggap linier. Semua kurva beton mempunyai bentuk serupa, seperti tampak pada gambar 2.2. Bagian awal kurva adalah lurus yang menunjukkan sifat elastis, pada kondisi ini besarnya tegangan dan regangan sebanding. Selanjutnya mulai melengkung mendekati horisontal, pada kondisi ini tercapai tegangan maksimum. Keadaan ini terjadi pada regangan antara 0,002 sampai 0,003 untuk beton normal, nilai ini lebih besar jika kekuatan beton lebih tinggi. Kurva tersebut menunjukkan penurunan lebih tajam pada beton mutu tinggi daripada mutu rendah setelah tegangan maksimum tercapai dan bentuk kurva tergantung pada metode pengujian yang digunakan.

#### **2.2.4 Baja Bermutu Tinggi**

Baja mutu tinggi merupakan syarat bagi bahan yang dipakai dalam elemen beton prategang untuk menghasilkan gaya yang besar pada tendon prategang. Biasanya baja mutu tinggi yang dipakai dalam struktur beton prategang adalah berupa kawat, batang baja, dan untaian kawat baja (*strand*). Strand dengan 7 kawat biasanya dipakai untuk sistem pascatarik pada praktek, karena mempunyai karakteristik rekatan yang lebih baik dibandingkan penggunaan tendon jenis lain.

Ada beberapa kriteria yang perlu dipertimbangkan berkaitan dengan karakteristik bahan yang akan digunakan sebagai tendon prategang, misalnya kekuatan tarik tinggi, modulus elastis rendah, regangan tinggi pada saat tegangan awal sehingga akan mengurangi kehilangan tegangan akibat sifat beton yang tidak elastis. Disisi lain, kekuatan tarik tinggi menghasilkan luasan

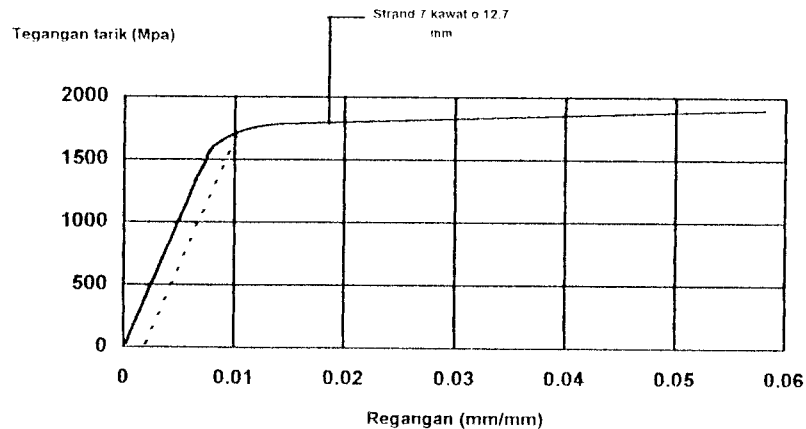
tendon yang kecil dan ini berkaitan dengan modulus elastisitas yang rendah hingga dapat menghasilkan lendutan yang besar pada beban berlebihan yang akan menyebabkan retak.

Karakteristik dari bahan yang digunakan untuk tendon prategang dapat disimpulkan sebagai berikut ini :

1. Mutu tinggi dengan tegangan prategang tinggi sehingga menghasilkan kekuatan yang tinggi.
2. Tetap elastis pada tegangan tinggi.
3. Kondisi plastis tercapai pada tegangan yang tinggi.
4. Modulus elastisitas rendah pada saat penarikan, sehingga mengurangi kehilangan gaya prategang.
5. Modulus elastisitas tinggi setelah rekatan, sehingga memberikan kekakuan balok yang besar.
6. Tahan terhadap korosi.
7. Luas permukaan setiap tendon yang besar akan memperoleh karakteristik rekatan yang baik.
8. Permukaan bebas dari kotoran.

### **2.2.5 Karakteristik Tegangan-Regangan Baja**

Suatu sifat penting dari baja yang dipakai dalam beton prategang adalah plastisitas baja pada tegangan-tegangan baja mendekati tegangan ultimit. Hal ini penting untuk mengantisipasi keruntuhan progresif pada balok beton tersebut, dengan peringatan yang cukup sebelum keruntuhan akhir.



Gambar 2.3 Kurva Tegangan Regangan Baja (TY LIN ;1988)

Seperti terlihat pada gambar 2.3, bahwa batas elastis maupun titik leleh baja mutu tinggi tidak terlihat pada titik yang jelas, karena kurva dari keadaan lurus sedikit demi sedikit melengkung hingga mencapai batas ultimit. Tidak seperti halnya pada kurva untuk baja lunak, bila telah mencapai batas elastis maka baja akan mengalami leleh. Sehingga ada berbagai cara untuk menentukan titik leleh baja mutu tinggi, seperti pergeseran (set) 0,1 %, pergeseran 0,2%, regangan 0,7%, atau regangan 1%. Cara yang paling umum diterima adalah pergeseran 0,2%, dan regangan 1%. Pergeseran 0,2% adalah menentukan titik leleh baja mutu tinggi dengan cara memberikan regangan sebesar 0,2% pada awal kurva. Kemudian menarik garis lurus sejajar dengan garis elastis sampai memotong kurva, dan titik perpotongan antara pergeseran garis elastis dengan kurva adalah titik leleh baja. Regangan 1%, adalah titik leleh baja pada tegangan yang mengakibatkan regangan sebesar 1%.



## B A B III

### KEHILANGAN GAYA PRATEGANG

#### 3.1 Kehilangan Gaya Prategang

Tegangan-tegangan dalam beton prategang dapat dibuat sampai pada batas batas tertentu untuk menjamin hasil yang memenuhi syarat. Tegangan selama berbagai tahap pembebanan berubah-ubah karena kekuatan beton dan modulus elastisitas bertambah menurut waktu.

Dalam menganalisis, rancangan komponen struktur beton prategang harus mempertimbangkan gaya efektif dari tendon prategang yang bekerja pada setiap tahapan pembebanan struktur dan pemakaian sifat-sifat bahan yang berlaku pada peninjauan tegangan, dimana waktu merupakan variabel yang berpengaruh. Pemeriksaan kehilangan tegangan gaya prategang dapat dikelompokkan dalam dua kategori yaitu :

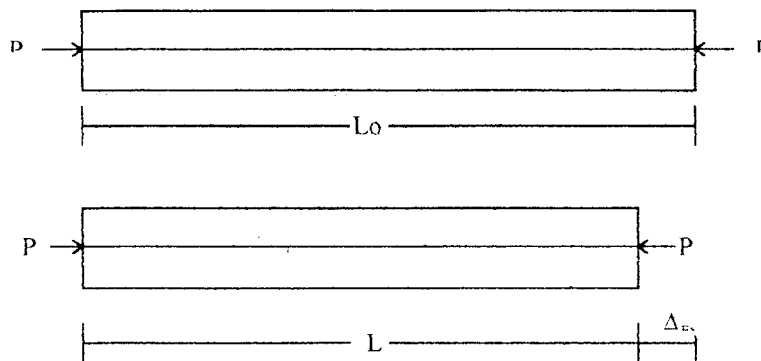
- a. Segera setelah transfer gaya prategang ke penampang beton. Pada tahap ini gaya pengangkuran prategang segera direduksi dengan kehilangan akibat gesekan (*friction*), slip pada angkur dan deformasi elastis beton akibat tekanan angkur ke penampang. Pengecekan dilakukan terhadap gaya terbesar pada tendon yang bekerja pada beton yang mungkin jauh di bawah kekuatan pada umur 28 hari. Peraturan ACI memperkenankan tegangan ijin beton pada saat transfer gaya prategang sebesar  $f'_{ci} \leq f'_c$ .
- b. Saat beban layan, setelah semua kehilangan gaya prategang terjadi. Dalam jangka waktu lama, juga terjadi kehilangan gaya prategang secara berangsur-angsur.

yang diakibatkan oleh susut dan rangkak beton serta relaksasi baja. Setelah terjadi seluruh kehilangan gaya prategang, tegangan efektif pada baja ( $f_{se}$ ) diasumsikan sebagai tegangan tendon. Kekuatan beton dianggap bertambah menjadi  $f'_c$ .

Beberapa struktur tertentu dapat diberikan prategang secara bertahap untuk memberikan perlawanan pada struktur. Hal ini dimungkinkan, tetapi harus mengevaluasi tegangan pada tahapan antara, sehingga menjamin perilaku yang memenuhi syarat disetiap kondisi kritis. Jumlah kehilangan gaya prategang berkaitan erat dengan kondisi lingkungan masing-masing bahan serta sifat-sifat bahan yang digunakan sebagai komponen penyusun elemen beton prategang.

### 3.1.1 Akibat Deformasi Elastis Beton

Pada saat gaya prategang ditransfer ke beton, komponen struktur akan memendek seiring dengan memendeknya baja akibat dilepaskannya tendon dari alat penarik (*jacking*). Pertama-tama ditinjau perpendekan beton searah sumbu yang hanya diakibatkan oleh gaya prategang, seperti terlihat pada gambar 3.1.



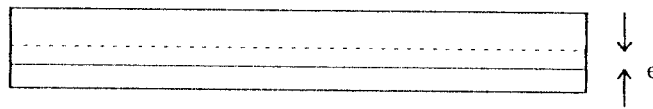
Gambar 3.1 Deformasi beton akibat tendon konsentris

$$\epsilon_{ES} = \frac{\Delta_{ES}}{l_o} \quad (\text{satuan perpendekan beton}) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{ES} &= \frac{f_c}{E_{ci}} \\ &= \frac{P_i}{A \cdot E_{ci}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

sehingga tendon akan mengalami reduksi tegangan sesuai dengan perpendekan beton, sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Delta f_{p_{ES}} &= E_{ps} \cdot \epsilon_{ES} \\ &= E_{ps} \cdot \frac{P_i}{A \cdot E_{ci}} \\ &= n_i \cdot f_{cs} \end{aligned} \quad (3.3)$$



Gambar 3.2 Elemen prategang eksentris

Pada balok prartarik, tendon direkatkan ke beton pada saat transfer, sehingga perubahan regangan baja sama dengan perubahan beton pada posisi baja. Untuk kondisi ini kehilangan tegangan baja dihitung berdasarkan penampang transformasi. Bila tendon mempunyai eksentrisitas sebesar  $e$  dan bekerja momen lentur akibat berat sendiri balok, maka tegangan beton pada posisi baja adalah :

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P}{A} - \frac{P \cdot e \cdot c}{I} + \frac{M \cdot c}{I} \\ &= -\frac{P_i}{A_t} - \frac{P_i \cdot e \cdot e}{I_t} + \frac{M_o \cdot e}{I_t} \end{aligned}$$

$$= -\frac{P_i}{\Lambda t} \left( 1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_o \cdot e}{I_t} \quad (3.4)$$

sehingga persamaan (3.3) menjadi :

$$\Delta f_{p_{rs}} = -n_i \left[ \frac{P_i}{\Lambda t} \left( 1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_o \cdot e}{I_t} \right] \quad (3.5)$$

Pada balok pascatarik, persoalannya sangat berbeda, jika hanya ada sebuah tendon atau semua tendon ditarik bersama-sama maka tidak akan kehilangan gaya prategang yang perlu dihitung. Karena kehilangan gaya prategang dihitung setelah terjadinya deformasi elastis beton.

Untuk balok pascatarik dengan dua tendon atau lebih yang ditarik secara berurutan, maka gaya prategang secara bertahap bekerja pada beton akibat pengangkuran tendon-tendon berikutnya. Pada pengangkuran tendon, tendon pertama yang diangkurkan akan mengalami kehilangan tegangan jika tendon kedua diangkurkan. Tendon pertama dan kedua akan kehilangan tegangan akibat pengangkuran tendon ketiga dan seterusnya. Sehingga kehilangan gaya prategang pada setiap tendon akan berbeda-beda, tendon yang ditarik pertama kali akan mengalami kehilangan tegangan terbesar akibat deformasi elastis beton karena gaya prategang yang bekerja berurutan pada tendon berikutnya. Tendon yang ditarik terakhir kali tidak akan mengalami kehilangan tegangan karena tegangan diukur setelah tendon diangkurkan.

kehilangan tegangan tendon pertama akibat penarikan tendon kedua adalah sebagai berikut :

$$(\Delta f_{p_{rs}})_2 = n_i \cdot f_{cs}$$

dimana :

$$(f_{cs})_2 = -\frac{P_{i,2}}{\Lambda c} \left( 1 + \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \right)$$

$$= -\frac{F_{ps_2} \cdot \Delta p_{s_2}}{\Delta c} \left( 1 + \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \right) \quad (3.6)$$

maka :

$$(\Delta f_{p_{ES1}})_2 = -n_i \left( \frac{f_{ps_2} \cdot \Delta p_{s_2}}{\Delta c} \left( 1 + \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \right) \right) \quad (3.7)$$

bila terjadi  $N$  kali penarikan, maka kehilangan gaya prategang pada tendon pertama adalah sebagai berikut :

$$(\Delta f_{p_{ES1}}) = -n_i \sum_{k=2}^N \left( \frac{P_{i_k}}{\Delta c} \left( 1 + \frac{e_1 \cdot e_k}{r^2} \right) \right) \quad (3.8)$$

sehingga total kehilangan gaya prategang tiap tendon, jika terjadi  $N$  kali penarikan adalah :

$$\begin{aligned} (\Delta f_{p_{ESi}}) &= -n_i \sum_{k=j+1}^N \left( \frac{P_{i_k}}{\Delta c} \left( 1 + \frac{e_j \cdot e_k}{r^2} \right) \right) \\ &= -n_i \sum_{k=j+1}^N \left( \frac{f_{ps_k} \cdot \Delta p_{s_k}}{\Delta c} \left( 1 + \frac{e_j \cdot e_k}{r^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

sedangkan gaya yang menimbulkan kehilangan tegangan adalah :

$$P_i = \sum_{j=2}^N P_{i_j} \quad (3.10)$$

maka kehilangan total untuk seluruh tendon yang ditarik adalah :

$$(\Delta f_{p_{ES}}) = \sum_{j=1}^N \frac{\Delta p_{s_j} (\Delta f_{p_{ESj}})}{\sum_{i=1}^N \Delta p_{s_i}} \quad (3.11)$$

### 3.1.2 Akibat Rangkak Beton

Rangkak beton didefinisikan sebagai perubahan regangan yang terjadi pada beton yang mengalami tegangan konstan. Hal yang mempengaruhi rangkakan beton adalah hilangnya kelembaban relatif yang mempengaruhi susut beton, umur saat diberikan gaya prategang, dan kualitas beton yang digunakan.

Dalam balok beton prategang, tekanan yang menyebabkan rangkak tidak konstan, tetapi berkurang dengan bertambahnya waktu akibat relaksasi tegangan baja dan susut beton. Hal tersebut mengakibatkan perubahan panjang yang berkaitan dengan rangkak itu sendiri. Tegangan beton yang dijadikan dasar perhitungan kehilangan tegangan akibat rangkak adalah tegangan beton pada posisi baja. Sedangkan rangkak dianggap terjadi setelah penambahan beban mati permanen pada elemen struktur setelah beton diberi gaya prategang, sehingga resultan dari regangan tekan awal akibat gaya prategang yang terjadi segera setelah transfer dan regangan tarik akibat beban mati permanen merupakan variabel yang digunakan dalam perhitungan rangkak. Kehilangan tegangan akibat rangkak untuk elemen struktur dengan tendon terekat dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta f_{p_{CR}} = n \cdot K_{CR} (f_{cs} - f_{csd}) \quad (3.12)$$

dimana :  $K_{CR} = 2,0$  untuk elemen struktur pratarik

$K_{CR} = 1,6$  untuk elemen struktur pascatarik

$f_{cs}$  = tegangan beton diposisi baja setelah transfer, yang sesuai dengan persamaan (3.14)

$f_{csd}$  = tegangan beton diposisi baja akibat penambahan beban mati tambahan

Jika digunakan beton pasir ringan, maka nilai  $K_{CR}$  direduksi hingga 20%. Terjadi kehilangan gaya prategang cukup berarti akibat deformasi elastis beton pasir ringan, karena beton pasir ringan mempunyai modulus elastisitas rendah, maka mengakibatkan pengurangan terhadap koefisien rangkak.

### 3.1.3 Akibat Susut Beton

Susut beton didefinisikan sebagai perubahan volume beton. Susut beton merupakan salah satu faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam rancangan elemen beton prategang. Susut akan menyebabkan kehilangan

tegangan karena terjadi perpendekan kawat prategang yang ditarik. Jika susut terhambat akibat temperatur dan kelembaban lingkungan, maka jika ada gaya, dapat mengurangi kekuatan elemen struktur. Susut beton dipengaruhi oleh banyak faktor antara lain banyaknya semen, sifat-sifat fisik dan ukuran agregat, jumlah air, metode dan lamanya perawatan, suhu dan kelembaban lingkungan, rasio volume-luas permukaan serta bahan aditive yang digunakan. Rancangan elemen struktur beton prategang harus memperhatikan pengaruh setiap faktor diatas untuk mengambil pertimbangan yang baik terhadap penggunaan material dan metode khusus untuk setiap pekerjaan.

Perkiraan terjadinya susut dapat dilakukan melalui pendekatan dengan mempertimbangkan besaran-besaran yang mempengaruhinya, yaitu modulus elastisitas, kelembaban relatif, perbandingan volume terhadap luas permukaan. Kehilangan gaya prategang akibat susut adalah hasil susut relatif,  $\epsilon_{SH}$  dan modulus elastisitas dari baja prategang, karena susut tergantung dari waktu. Susut akan terjadi dalam beberapa tahun, dan terjadi kurang lebih sebesar 80% pada tahun pertama. Kehilangan tegangan akibat susut dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut ini :

$$\Delta f_{p_{SH}} = \epsilon_{SH} \cdot E_{ps} \quad (3.13)$$

Seperti halnya rangkai, terdapat variasi terhadap besarnya nilai regangan. Untuk perhitungan diambil regangan susut rata-rata sebesar  $550 \times 10^{-6}$  in/in. Faktor-faktor seperti perbandingan volume terhadap luas permukaan (V/S) dan kelembaban relatif (RH) akan sangat mempengaruhi besarnya nilai regangan susut. Besarnya regangan susut beton akan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \epsilon_{SH} &= 550 \times 10^{-6} \left( 1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (1,5 - 0,015 RH) \\ &= 8,2 \times 10^{-6} \left( 1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Dalam elemen struktur pascatarik, pengangkuran tendon dilakukan setelah sebagian susut beton terjadi. Hal ini menguntungkan karena terdapat reduksi terhadap besarnya regangan susut, sehingga dapat mereduksi besarnya kehilangan tegangan akibat susut. Persamaan (3.14) dikoreksi dengan faktor  $K_{SH}$  untuk elemen strktur pascatarik. Besarnya nilai-nilai  $K_{SH}$  dapat dilihat pada tabel 2-1.

Tabel 3-1 Nilai  $K_{SH}$  untuk elemen pascatarik (T Y.LIN ;1988)

| Jangka waktu setelah perawatan basah sampai pada penerapan prategang (hari) | 1    | 3    | 5    | 7    | 10   | 20   | 30   | 60   |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $K_{SH}$                                                                    | 0,92 | 0,85 | 0,80 | 0,77 | 0,73 | 0,64 | 0,58 | 0,45 |

Besarnya kehilangan tegangan akibat susut beton dapat dilihat pada persamaan berikut ini.

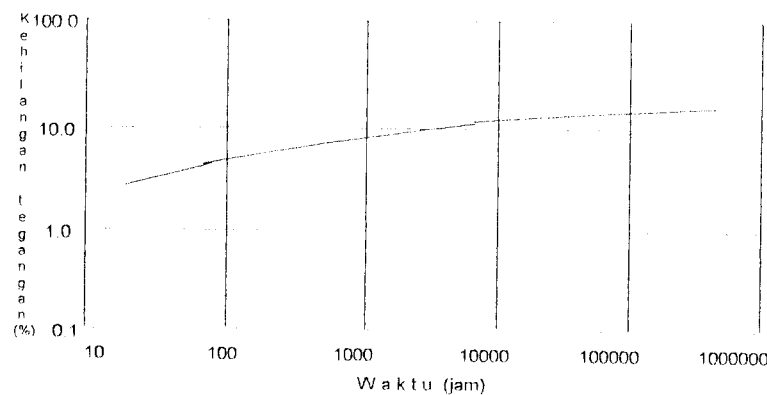
$$\begin{aligned}\Delta f_{p_{SH}} &= \epsilon_{SH} \cdot E_{ps} \\ &= 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} \left( 1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) E_{ps}\end{aligned}\quad (3.15)$$

### 3.1.4 Akibat Relaksasi Baja

Relaksasi didefinisikan sebagai kehilangan tegangan dalam suatu material yang dikenai tegangan dan dijaga pada regangan konstan. Walaupun tendon tidak mengalami regangan konstan atau tegangan konstan, maka umumnya disesuaikan pada kondisi yang hampir mendekati regangan konstan. Untuk itu studi tentang relaksasi dibuat untuk mengevaluasi kehilangan prategang yang dapat dianggap menjadikan perilaku baja tidak elastis karena perilaku beton. Seperti ditunjukkan dalam kurva kehilangan tegangan terhadap waktu pada gambar 3.3, yang menunjukkan perilaku baja yang tidak elastis.

Tendon prategang yang ditegangkan pada dasarnya mempunyai panjang konstan selama umur struktur, walaupun ada beberapa reduksi panjang akibat

susut dan rangkak beton yang menghasilkan perubahan volume atau panjang yang tidak elastis. Setelah tendon diangkurkan pada beton akan menyebabkan perpendekan pada beton yang diikuti oleh tendon, dan dengan rekatan akan mereduksi kehilangan tegangan akibat relaksasi baja. Besarnya relaksasi tegangan baja juga tergantung pada intensitas tegangan baja maupun waktu.



Gambar 3.3 Kurva kehilangan tegangan terhadap waktu untuk kawat stress relieved pada 70% fpu dan dijaga pada panjang konstan dengan suhu 85 F (LIBBY;1987)

Rasio tegangan antara reduksi tegangan  $f_p$  dan tegangan awal  $f'_{pi}$  dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$\frac{f_p}{f'_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{10} \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.16)$$

dimana  $f_{py}$  adalah tegangan leleh efektif,  $t$  adalah waktu dalam jam setelah penarikan,  $\log t$  dengan bilangan dasar sepuluh dan  $f'_{pi}/f_{py}$  tidak kurang dari 0,55. Sehingga kehilangan tegangan akibat relaksasi baja adalah :

$$\Delta f_{p_R} = f'_{pi} \left( \frac{\log t}{10} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.17)$$

sedangkan untuk analisa secara bertahap, besarnya kehilangan dalam beberapa interval waktu dapat diperoleh berdasarkan persamaan ini :

$$\Delta f_{p_R} = f'_{pi} \left( \frac{\log t_n - \log t_r}{10} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.18)$$

dimana  $t_n$  adalah waktu pada akhir interval dan  $t_r$  adalah waktu pada permulaan interval.

Persamaan (3.18) juga berguna untuk menghitung besarnya kehilangan tegangan akibat relaksasi baja pada batang pratarik, dan terjadi sebelum beton dicetak. Hal tersebut dapat dipertimbangkan sebagai tegangan awal dalam perhitungan kehilangan tegangan akibat susut dan rangkai.

Untuk baja relaksasi rendah yang digunakan dalam suatu rancangan, akibat kehilangan tegangan akibat relaksasi lebih kecil, sehingga persamaan (3.17) dan (3.18) akan menjadi :

$$\Delta f_{r_R} = f'_{pi} \left( \frac{\log t}{45} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.19)$$

$$\Delta f_{r_R} = f'_{pi} \left( \frac{\log t_n - \log t_r}{45} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (3.20)$$

Dari persamaan diatas, jumlah kehilangan tegangan akibat relaksasi baja tergantung dari besar tegangan awal, dan ini merupakan suatu alasan dalam membatasi tegangan awal maksimum.

### 3.1.5 Akibat Gesekan

Kehilangan tegangan akibat gesekan adalah akibat adanya gesekan antara bahan pada sistem penarikan dan pengangkuran, sehingga tegangan yang ada pada tendon akan berkurang dari yang ditunjukkan pada alat pengukur tegangan pada alat penarik. Hal ini disebabkan oleh banyak faktor diantaranya adalah jenis bahan, ukuran elemen, serta metode pelaksanaan di lapangan. Kehilangan tegangan yang terjadi akibat gesekan dapat direduksi dengan jalan melakukan penarikan lebih, sehingga tegangan yang terjadi akan sesuai dengan yang diperhitungkan, tetapi harus tetap berada di bawah titik leleh baja serta gaya tarik maksimum. Hal lain yang perlu dipertimbangkan dalam penarikan berlebih ialah adanya relaksasi baja pada balok prategang. Gesekan yang terjadi antara tendon dan bahan sekelilingnya, walaupun diberi

bahan pelumas atau tidak, tetap akan mengakibatkan kehilangan tegangan. Dalam memberikan pelumas untuk mengurangi gesekan, pelumas yang digunakan dan cara memberikannya harus lebih hati-hati karena dapat mempengaruhi rekatan (*grouting*) antara baja dan beton.

Kehilangan tegangan akibat gesekan dapat dipertimbangkan pada dua bagian yaitu, pengaruh panjang dan pengaruh kelengkungan. Pengaruh panjang dijumpai jika tendon lurus, tidak dirancang bengkok atau melengkung. Meskipun demikian pada prakteknya, selubung tendon tidak dapat lurus sepenuhnya, sehingga akan ada gesekan antara tendon dan bahan sekelilingnya. Hal ini dijelaskan sebagai pengaruh naik turunnya selubung (*wobbling effect*), dan hal ini tergantung dari panjang dan tegangan tendon, koefisien gesek antara bahan dan metode yang digunakan untuk meluruskan selubung. Kehilangan tegangan akibat pengaruh kelengkungan dihasilkan dari kelengkungan tendon yang diinginkan sebagai tambahan penyimpangan pada naik turunnya selubung. Selain adanya gesekan antara bahan, kehilangan tegangan juga tergantung pada tekanan tendon pada beton, sedangkan koefisien gesekan sendiri tergantung dari kelicinan dan sifat-sifat pelumas, dan panjang bidang kontak. tekanan antara tendon dan beton tergantung pada tegangan tendon dan perubahan susut kelengkungan.

Telah banyak percobaan yang dilakukan untuk menentukan besarnya koefisien gesekan akibat pengaruh naik turunnya kabel (*wobbling effect*), dalam menganalisa kehilangan tegangan akibat gesekan. Besarnya koefisien gesekan,  $\mu$  dan  $K$ , seperti yang ditunjukkan dalam tabel 3-2 tergantung dari beberapa faktor diantaranya, tipe baja yang digunakan, macam permukaan, serta karakteristik bahan yang dipakai.

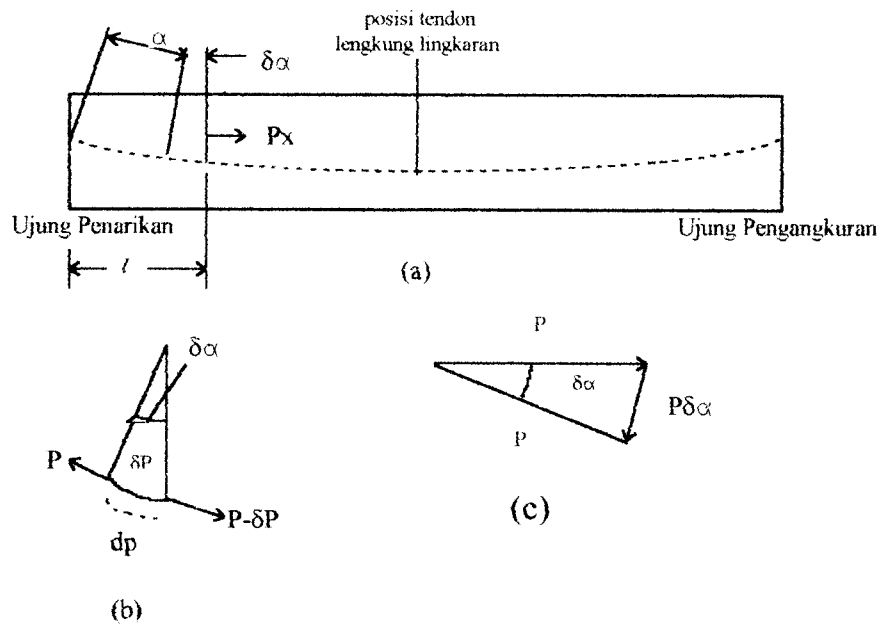
Tabel 3-2 Koefisien-koefisien gesekan untuk tendon pasca tarik(LIN ;1988)

| Tipe Tendon                                      | Koefisien Wobble<br>K tiap meter | Koefisien Kelengkungan |
|--------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Tendon pada selubung logam fleksibel.            |                                  |                        |
| ■ tendon kawat                                   | 0,0033-0,0049                    | 0,150-0,250            |
| ■ strand dengan untaian 7 kawat                  | 0,0016-0,0066                    | 0,150-0,250            |
| ■ batang baja mutu tinggi                        | 0,0003-0,0020                    | 0,080-0,300            |
| Tendon pada selubung logam kaku                  |                                  |                        |
| ■ strand dengan untaian 7 kawat                  | 0,0007                           | 0,150-0,250            |
| Tendon yang diminyaki terlebih dahulu            |                                  |                        |
| ■ tendon kawat dan strand dengan untaian 7 kawat | 0,0010-0,0066                    | 0,050-0,150            |
| Tendon yang diberi lapisan mastik                |                                  |                        |
| ■ tendon kawat dan strand dengan untaian 7 kawat | 0,0033-0,0066                    | 0,050-0,150            |

Untuk batang-batang pascatarik, tendon biasanya diangkurkan pada ujung yang satu dan ditegangkan dengan jacking pada ujung yang lain. Karena pengaruh penggelinciran tendon terhadap saluran, sehingga terjadi perlawanan gesekan yang menyebabkan tegangan tarik kurang dari yang ditunjukkan pada alat penarik. Besarnya kehilangan tegangan akibat gesekan adalah pengaruh simpangan kelengkungan (*wobbling effect*) dan pengaruh kelengkungan tendon. Jumlah kehilangan tegangan gaya prategang  $\delta p$  akibat simpangan kelengkungan dalam elemen tendon sepanjang  $\delta x$  dapat dinyatakan dengan :

$$\delta p = K \cdot P \cdot \delta x \quad (a)$$

Dimana gaya prategang  $P$  adalah fungsi dari bentang sepanjang  $x$  dan  $K$  adalah koefisien gesekan akibat simpangan kelengkungan yang ditunjukkan dalam tabel 3-2.



Gambar 3.4 Gesekan dalam elemen lentur prategang

- (a) kelengkungan tendon
- (b) elemen kelengkungan
- (c) poligon gaya

Persamaan untuk kehilangan gaya prategang yang berkaitan dengan kelengkungan tendon dapat diturunkan pada gambar 3.4. Gambar 3.4(a) menunjukkan tendon melengkung yang memperoleh gaya  $P_s$  pada ujung penarikan, sehingga pengurangan gaya pada jarak  $L$  adalah  $P_x$ . Kehilangan gaya prategang pada elemen kecil dengan perubahan sudut  $\delta\alpha$  adalah  $\delta P$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4 (b). Berdasarkan poligon gaya yang bekerja pada elemen kecil seperti pada gambar 3.4 (c), komponen gaya normal pada tendon adalah  $P\delta\alpha$ . Bila koefisien gesekan antara tendon dan saluran adalah  $\mu$ , maka kehilangan gaya prategang  $\delta P$  akibat kelengkungan adalah :

$$\delta P = \mu P \delta\alpha \quad (b)$$

nilai  $\mu$  ditetapkan dengan percobaan dan ditunjukkan dalam tabel 3-2,

sehingga total kehilangan gaya prategang dari simpangan kelengkungan tendon adalah :

$$\delta P = K \cdot P \cdot \delta x + \mu \cdot P \cdot \delta \alpha \quad (c)$$

kehilangan akibat gesekan dapat dinyatakan sebagai rasio  $\frac{\delta P}{P}$ , sehingga persamaan diatas bila diintegrasikan antara batas yang sesuai adalah :

$$\int_{P_x}^{P_s} \frac{\delta P}{P} = \int_0^L K \cdot \delta x + \int_0^{\alpha} \mu \delta x$$

$$\ln \frac{P_s}{P_x} = K \cdot L + \mu \alpha$$

maka hubungan antara gaya prategang  $P_s$  pada ujung penarikan dan reduksi harga  $P_x$  pada jarak  $L$  dari ujung penarikan adalah :

$$P_s = P_x \cdot e^{(K \cdot L + \mu \alpha)} \quad (3.21)$$

jika kehilangan akibat gesekan cukup rendah, maka perhitungan kehilangan prategang dapat didasarkan atas gaya tarik  $P_x$  pada jarak  $L$  dari ujung penarikan sebagai berikut ini :

$$P_s - P_x = K \cdot P_x L + \mu \cdot P_x \alpha$$

sehingga :

$$P_s = P_x (1 + K \cdot L + \mu \alpha) \quad (3.22)$$

sesuai dengan peraturan ACI, pendekatan ini dapat diterima jika  $(K \cdot L + \mu \alpha) \leq 0,30$ . Didasarkan hubungan persamaan (3.21) dan (3.22) boleh juga dinyatakan dalam batas kehilangan tegangan. Dari persamaan (3.21), maka :

$$P_x = P_s \cdot e^{-(K \cdot L + \mu \alpha)} \quad (3.23)$$

kehilangan gaya prategang akibat kelengkungan dan simpangan kelengkungan menjadi :

$$\Delta P_F = P_S - P_X = P_S \left( 1 - e^{-(K.L + \mu\alpha)} \right) \quad (3.24)$$

jika dibagi dengan luasan tendon  $A_p$ , memberikan kehilangan tegangan hasil dari gesekan adalah :

$$\Delta f_{p_F} = f_p \left( 1 - e^{-(K.L + \mu\alpha)} \right) \quad (3.25)$$

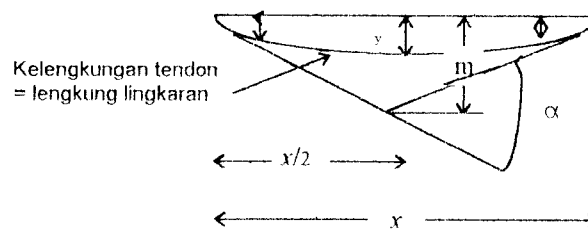
dimana  $f_p$  adalah tegangan tendon pada alat penarik (*jacking*). Berdasarkan hubungan pendekatan yang diberikan pada persamaan (3.22), maka :

$$\begin{aligned} \Delta P_F &= P_S - P_X = P_X (K.L + \mu\alpha) \\ &= P_S (K.L + \mu\alpha) \end{aligned}$$

sehingga kehilangan tegangan akibat gesekan adalah :

$$\Delta f_{p_F} = f_p (K.L + \mu\alpha) \quad (3.26)$$

Masalah geometri sering dijumpai dalam penentuan kehilangan tegangan akibat gesekan. Anggapan sebagai busur lingkaran untuk kelengkungan tendon dengan koordinat yang diketahui pada kedua ujungnya dan tengah bentang, adalah untuk menyederhanakan perhitungan besarnya sudut pusat  $\alpha$ .



Gambar 3.5 Pendekatan untuk menetapkan sudut pusat suatu tendon melengkung.

jika kelengkungan relatif landai, pendekatan perhitungan tersebut akan memadai. Pada gambar 3.5, jika sudut pusat adalah  $\alpha$ , slope pada kedua ujungnya adalah  $\alpha/2$ , sehingga :

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{y}{x/2} = \frac{2y}{x}$$

Jarak  $m$  mendekati sama dengan 2 kali besarnya  $y$ . Untuk sudut-sudut kecil, tangen sudut kira-kira sama dengan sudut itu sendiri dan diukur dalam radian, sehingga :

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{4y}{x}$$

sehingga :

$$\alpha = \frac{8y}{x} \quad \text{radian} \quad (3.27)$$

jika bentuk kelengkungan tendon bervariasi antara bentuk lurus dan melengkung, maka kehilangan tegangan akibat gesekan dihitung tiap segmen.

### 3.1.6 Akibat Slip Angkur

Dalam batang pascatarik jika gaya penarikan dilepas, maka tegangan tarik baja ditransfer ke beton. Sejumlah slip yang terjadi setelah transfer, seperti masuknya kedudukan baja pada ujung balok atau deformasi pada angkur tidak dapat dihindari. Hal serupa juga terjadi pada batang pratarik, yaitu jika gaya prategang ditransfer dari alat penarik ke angkur permanen penjepit strand pada alas pencetakan. Dalam kedua hal tersebut, kehilangan tegangan akibat slip angkur dapat diatasi dengan penarikan berlebih yang diberikan sebesar tegangan yang menyebabkan masuknya pasak dalam ujung angkur. Besarnya kehilangan tegangan akibat deformasi pengangkuran  $\Delta a$  dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$\Delta f_{p_a} = \frac{\Delta a \cdot E_p}{L} \quad (3.28)$$

Persamaan diatas didasarkan pada anggapan bahwa slip terdistribusi seragam sepanjang tendon, sehingga jumlah pemendekan keseluruhan tendon akan menyebabkan kehilangan tegangan. Hal ini menyebabkan prosentase kehilangan akan lebih tinggi pada kabel pendek. Untuk batang pendek, penggelinciran angkur merupakan suatu hal yang berpengaruh besar.



## **B A B IV**

### **KEKUATAN PENAMPANG BALOK TERHADAP LENTUR**

#### **4.1 Sistem Prategang Sebagian**

Elemen struktur prategang sebagian adalah elemen struktur prategang yang direncanakan dengan mengijinkan terjadinya tegangan tarik pada beban kerja. Namun demikian tidak semua struktur yang direncanakan dengan prategang sebagian akan mengalami tegangan tarik pada tegangan kerja . Demikian juga sebaliknya, pada struktur yang direncanakan dengan sistem prategang penuh mungkin akan mengalami tegangan tarik pada beban kerja berlebihan.

Pada balok prategang sebagian, akibat diijikannya tegangan tarik pada beton kadang-kadang mengalami permasalahan, karena beton mungkin sudah retak sebelumnya sehingga tidak dapat menahan tarikan. Sistem prategang penuh juga menemui permasalahan, yaitu akan terjadi lendutan keatas berlebihan yang tidak dikehendaki.

Sistem prategang sebagian telah mencapai maksud untuk menghilangkan atau mengontrol lebar retak pada beban kerja dengan menetapkan tegangan tarik yang diijinkan sedikit lebih kecil dari tegangan retak beton. Walaupun demikian tetap dibutuhkan kewaspadaan pada sistem prategang sebagian, jika kemungkinan terjadinya retak akibat beban kerja. Bila dibandingkan dengan

beton bertulang, tegangan tarik tinggi dan retak biasanya terjadi pada beban kerja, maka cukup logis untuk mengijinkan terjadinya tarik kecil pada beton prategang.

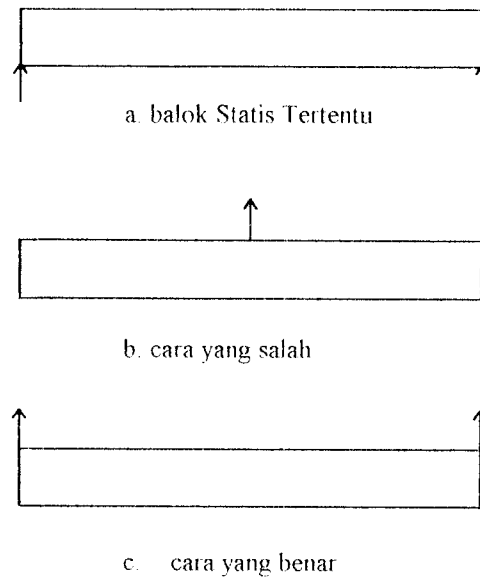
#### **4.2 Tahapan Pembebanan**

Banyaknya tahapan yang harus dilalui dalam perancangan dan analisis pada beton prategang mengakibatkan banyak pekerjaan harus diselesaikan. Suatu pertimbangan khusus pada beton prategang adalah banyaknya tahapan pembebanan bila sebuah elemen struktur dibebani. Untuk elemen struktur yang dicor ditempat, pada beton prategang harus diperiksa minimal dua tahap, masing-masing adalah saat transfer atau saat pemberian gaya prategang dan saat layan. Sedangkan untuk elemen struktur pracetak, selain kedua tahap diatas ada satu tahap lagi yaitu saat pengangkatan atau pengangkutan.

Sebelum diberikan gaya prategang, beton sangat lemah dalam memikul beban sehingga harus dicegah dari kehancuran. Bila gaya prategang diberikan sampai batas maksimum pada beton yang belum cukup umur, dengan mutu rendah dan mengalami keropos pada saat pengecoran, maka untuk itu diperlukan pemeliharaan yang baik terhadap beton sebelum diberikan gaya prategang. Pemeliharaan yang baik adalah ketelitian saat pengecoran dan melakukan uji sampel untuk mengetahui mutu beton di laboratorium. Dengan demikian akan mereduksi atau menghindari terjadinya retak-retak yang merugikan.

Untuk elemen pratarik, peralihan gaya prategang akan terjadi sekaligus dalam waktu singkat. Pada elemen pascatarik, peralihan seringkali terjadi secara bertahap, sebab umumnya penarikan tendon-tendon pascatarik dilakukan satu per satu secara berurutan, sehingga pada kondisi ini pengecekan secara bertahap terhadap besarnya gaya prategang harus dilakukan secara teliti. Pada saat transfer, tidak ada gaya eksternal yang bekerja kecuali berat sendiri struktur. Perencanaan ekonomis akan memperhitungkan berat

sendiri struktur untuk mengimbangi lendutan keatas akibat gaya prategang. Karena jika hal ini tidak diperhitungkan bisa terjadi momen positif yang besar hingga dapat mengakibatkan retak serat tarik pada beban penuh.



Gambar 4.1 Cara Pengangkatan Balok Sederhana

Pada elemen pracetak, saat pengangkatan dan pengangkutan merupakan suatu tahapan tersendiri yang harus diperhatikan dengan baik. Kesalahan pada saat pengangkatan dapat menyebabkan retak-retak atau kehancuran total bila kesalahan serius terjadi saat pengangkatan. Gambar 4.1 menunjukkan cara pengangkatan balok diatas tumpuan sederhana.

Tabel 4-1 Tegangan-tegangan ijin batang-batang lentur (SK SNI-T-15-1991-03)

| Tegangan baja tidak melampaui nilai-nilai berikut                                                                                  |                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Akibat gaya pendongkrakan pada kabel :                                                                                          | 0.8 fpu atau 0.94fpy                                                                        |
| mana yang lebih kecil, tetapi tidak lebih besar dari nilai maksimum yang diusulkan oleh pembuat kabel prategang atau angkur.       |                                                                                             |
| 2. Tendon pratarik"segara setelah transfer" gaya prategang atau tendon-tendon pasca tarik setelah penjangkaran atau pengangkuran : | 0.70 fpu                                                                                    |
| Tegangan beton tidak melampaui nilai-nilai berikut :                                                                               |                                                                                             |
| 1. Segera setelah peralihan gaya prategang (sebelum kehilangan), tegangan-tegangan serat terluar :                                 |                                                                                             |
| tekan                                                                                                                              | $0.60 f'_{ci}$                                                                              |
| tarik                                                                                                                              | $0.25\sqrt{f'_{ci}}$ (kecuali pada ujung dua tumpuan dimana $0.5\sqrt{f'_{ci}}$ dianjurkan) |
| 2. Pada beban kerja setelah terjadi seluruh kehilangan gaya prategang :                                                            |                                                                                             |
| tekan                                                                                                                              | $0.45 f'_{ci}$                                                                              |
| tarik                                                                                                                              | $0.5\sqrt{f'_{ci}}$                                                                         |

Bila struktur sudah berfungsi, pengecekan terhadap beban kerja merupakan akhir dari tahapan pembebanan. Pada kondisi ini, harus dipertimbangkan berbagai macam kombinasi beban hidup yang bekerja disetiap bagian struktur, misalnya beban lateral seperti beban angin, dan gaya gempa, dan beban regangan akibat penurunan tumpuan dan pengaruh temperatur.

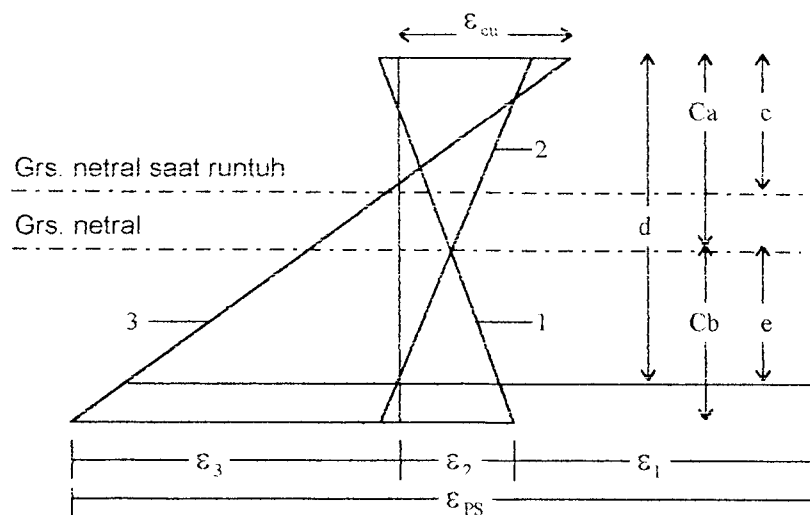
Besarnya lendutan yang terjadi, baik lendutan ke atas maupun ke bawah dari elemen struktur prategang akibat beban tetap, seringkali merupakan faktor penentu dalam desain, untuk itu besarnya dibatasi. Dalam desain beton prategang, retak merupakan kondisi yang harus dihindari. Sebab pada struktur-struktur tertentu seperti tangki-tangki dan pipa, awal terjadinya retak menunjukkan keadaan kritis. Karena korosi tendon atau lendutan berlebihan akibat retak merupakan masalah serius, maka perlu dievaluasi besarnya beban retak. Walaupun demikian terjadinya retak bukan merupakan akhir dari kemampuan suatu struktur.

Selain keadaan pembebanan normal diatas, beberapa struktur mungkin dibebani oleh beban berulang yang mengakibatkan keruntuhan akibat

kelelahan. Untuk struktur-struktur yang mengalami beban besar dalam jangka panjang akan menyebabkan deformasi berlebihan akibat rangkak. Pada bagian lain mungkin menerima beban eksternal yang ringan, sehingga lendutan ke atas akibat gaya prategang menjadi semakin besar sesuai dengan waktu. Hal-hal tersebut adalah keadaan yang perlu diperhatikan dengan baik oleh perancang untuk masing-masing keadaan.

### 4.3 Metode Kompatibilitas Regangan

Metode ini didasarkan atas hubungan antara regangan dan tegangan bahan secara langsung pada suatu penampang elemen yang menerima momen lentur. Untuk itu pengetahuan tentang karakteristik tegangan-regangan baik baja maupun beton sangat diperlukan dalam perhitungan kekuatan lentur, terutama untuk analisa lentur pada penampang retak, dan salah satu atau kedua bahan mungkin telah mendekati atau mencapai kekuatan ultimit.



Gambar 4.2 Gambar diagram regangan pada penampang balok prategang sampai mencapai keruntuhan

Analisis tegangan-regangan dilakukan pada penampang elemen untuk berbagai keadaan yang mungkin dialami, sehingga dapat diketahui juga besar kekuatan ultimitnya. Pada gambar 4.2, menunjukkan tegangan-regangan baja

maupun beton pada keadaan pembebanan. Distribusi regangan (1) dari gambar 4.2, adalah akibat adanya gaya prategang efektif,  $P_e$ , yang bekerja sendiri setelah kehilangan gaya prategang. Pada keadaan ini, hubungan tegangan dan regangan baja adalah :

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_c} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} \quad (4.2)$$

Regangan baja  $\varepsilon_1$ , berguna untuk menentukan posisi (2), yaitu posisi pada saat terjadinya dekompresi beton pada posisi baja. Untuk beton prategang dengan rekatan yang dianggap baik, maka kenaikan regangan baja akibat pembebanan dari posisi (1) ke posisi (2) adalah sama dengan pengurangan regangan beton pada posisi tendon, sehingga besarnya regangan baja adalah :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{cc} = \frac{P_e}{A_c \cdot E_c} \left( 1 + \frac{e^2}{r^2} \right) \quad (4.3)$$

Jika penampang tersebut dibebani sampai batas ultimit (3), regangan baja akan bertambah sebesar  $\varepsilon_3$ , yang diukur dari saat terjadinya dekompresi beton pada posisi baja. Sehingga regangan baja total pada saat runtuh,  $\varepsilon_{ps}$  adalah :

$$\varepsilon_{ps} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (4.4)$$

dan pada kondisi tersebut sesuai dengan tegangan baja pada saat runtuh,  $f_{ps}$ .

Regangan beton dalam keadaan batas,  $\varepsilon'_{cu}$

$$\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon'_{cu}} = \frac{d - c}{c}$$

sehingga didapatkan :

$$\varepsilon_3 = \frac{d - c}{c} \varepsilon'_{cu} \quad (4.5)$$

Letak garis netral saat runtuh pada serat atas tampang ,c dan dengan keseimbangan gaya dalam didapatkan  $C_c = T_s$

dengan  $C_c = 0,85 f'_c b a$

$$T_s = A_{ps} f_{ps}$$

maka didapatkan :

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0,85 f'_c b} \quad (4.6)$$

dimana  $b$  adalah lebar daerah tekan balok, dengan  $a = \beta_1 c$  maka didapatkan :

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (4.7)$$

Untuk mendapatkan harga  $\beta_1$  dilakukan pendekatan dengan kuat desak beton

$$\text{jika } f'_c \leq 30 \text{ Mpa} \quad \beta_1 = 0,85$$

$$\text{jika } 30 < f'_c < 55 \text{ Mpa} \quad \beta_1 = 0,85 - 0,008(f'_c - 30)$$

$$\text{jika } f'_c \geq 55 \quad \beta_1 = 0,65$$

dengan tegangan baja menurut peraturan ACI, untuk balok prategang dengan tendon terekat, sebesar :

(i) Untuk balok tanpa tulangan non-prategang

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - 0,5 \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} \right) \quad (4.8a)$$

(ii) Untuk balok dengan tulangan non-prategang

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{ds}{dps} (\omega - \omega') \right] \right) \quad (4.8b)$$

dengan :

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot dps}$$

-  $\gamma_p$  = faktor jenis tendon prategang

$$\gamma_p = 0,4 \quad \text{jika } \frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0,85$$

$$\gamma_p = 0,28 \quad \text{jika } \frac{f_{pu}}{f_{py}} \geq 0,90$$

$$\omega = \rho \frac{f_y}{f'_c} \quad \text{dengan} \quad \rho = \frac{A_s}{b \cdot d_s}$$

$$\omega' = \rho' \frac{f_y}{f'_c} \quad \text{dengan} \quad \rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d_s}$$

maka untuk menentukan kapasitas tampang balok beton prategang, yang dipengaruhi Indeks tulangan ( $q$ ), dan pusat luasan blok desak. Indeks tulangan ( $q$ ), sebesar :

(i) untuk balok tanpa tulangan non-prategang

$$q = \rho_p \frac{f_{ps}}{f'_c} \quad (4.9a)$$

(ii) untuk balok dengan tulangan non-prategang

$$q = \rho_p \frac{f_{ps}}{f'_c} + (\rho - \rho') \frac{f_y}{f'_c} \quad (4.9b)$$

dengan demikian didapatkan kapasitas tampang balok prategang,  $M_n$  sebesar:

1. Untuk indeks penulangan ,  $q \leq 0,3$

- bila letak pusat luasan blok desak jatuh pada sayap,  $h_t > 1,4 \cdot d \cdot \rho_p \frac{f_{ps}}{f'_c}$

(i) untuk balok tanpa tulangan prategang

$$M_n = f_{ps} \cdot A_{ps} \left( d_{ps} - \frac{a}{2} \right) \quad (4.10a)$$

(ii) untuk balok dengan tulangan non-prategang

$$M_n = f_{ps} \cdot A_{ps} \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (4.10b)$$

$$\text{dengan} \quad d = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot d_{ps} + A_s \cdot f_y \cdot d_s}{A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y}$$

-bila letak pusat luasan blok desak jatuh pada badan,  $h_t < 1,4 \cdot d \cdot \rho_p \frac{f_{ps}}{f'_c}$

(i) untuk balok tanpa tulangan non-prategang

$$M_n = f_{ps} \cdot A_{p_w} \left( d_{ps} - \frac{a}{2} \right) + f_{ps} \cdot A_{p_f} \left( d_{ps} - \frac{h_f}{2} \right) \quad (4.11a)$$

(ii) untuk balok dengan tulangan non-prategang

$$M_n = f_{ps} \cdot A_{p_w} \left( d - \frac{a}{2} \right) + f_{ps} \cdot A_{p_f} \left( d - \frac{h_f}{2} \right) \quad (4.11b)$$

$$\text{dengan } d = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot d_{ps} + A_s \cdot f_y \cdot d_s}{A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y}$$

1. untuk Indeks penulangan,  $q \geq 0,3$

- bila pusat luasan blok desak jatuh pada sayap

(i) untuk balok tanpa tulangan non-prategang

$$M_n = 0,25 \cdot f'_c \cdot b \cdot d_{ps}^2 \quad (4.12a)$$

(ii) untuk balok dengan tulangan non-prategang

$$M_n = 0,25 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2 + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (4.12b)$$

$$\text{dengan } d = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot d_{ps} + A_s \cdot f_y \cdot d_s}{A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y}$$

- bila pusat luasan blok desak jatuh pada badan

(i) untuk balok tanpa tulangan non-prategang

$$M_n = 0,25 \cdot f'_c \cdot b_w \cdot d_{ps}^2 + 0,85 \cdot f'_c (b - b_w) \cdot h_f \left( d_{ps} - \frac{h_f}{2} \right) \quad (4.13a)$$

(ii) untuk balok dengan tulangan non-prategang

$$M_n = 0,25 \cdot f'_c \cdot b_w \cdot d^2 + 0,85 \cdot f'_c (b - b_w) \cdot h_f \left( d - \frac{h_f}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d')$$

(4.13b)

dengan faktor reduksi,  $\phi = 0,9$ , maka besarnya momen ultimit adalah :

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (4.14)$$

#### 4.4 Retak Lentur

Terjadinya retak pada suatu elemen struktur diakibatkan karena terlampauinya tegangan tarik bahan. Dalam beberapa struktur, retak masih diijinkan dalam batas-batas tertentu sepanjang masih menjamin keamanan struktur. Menurut peraturan Inggris, India, dan CEB-FIP, struktur beton prategang dikelompokkan ke dalam tiga kelas, yaitu :

1. *Struktur kelas I*, tidak mengijinkan adanya tegangan tarik dan oleh karena itu tidak terjadi retakan akibat beban kerja. Pada kasus ini sering disebut prategang penuh (*Full Prestressed*)
2. *Struktur kelas II*, tegangan tariknya terbatas tetapi tidak diperkenankan adanya retakan yang terlihat akibat beban kerja. Tegangan tarik dibatasi sampai nilai-nilai yang lebih kecil daripada modulus retak beton. Pada kasus ini sering disebut prategang sedang (*Moderately Prestressed*)
3. *Struktur kelas III*, tegangan tarik dan retakan diperkenankan akibat beban kerja. Pada kasus ini sering disebut prategang sebagian (*Partially Prestressed*)

Keadaan yang menunjukkan terjadinya retak adalah perubahan tegangan pada serat bawah, dimulai dari timbulnya prakompresi akibat gaya prategang dan menjadi tegangan tarik sebesar modulus retak akibat beban eksternal. Momen yang menyebabkan retak-retak rambut pertama dianalisa dengan teori elastis. Analisa ini berdasarkan anggapan bahwa retak mulai terjadi saat tegangan ekstrim mencapai modulus retak, sedangkan besarnya modulus retak dihitung dengan persamaan (2.2). Momen retak dihitung dengan persamaan tegangan serat tarik ekstrim berdasarkan pada penampang homogen. Sehingga dapat ditulis :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_t} - \frac{P_e \cdot e \cdot C_b}{I_t} + \frac{M \cdot C_b}{I_t}$$

dengan  $f_b = f_r$ , maka :

$$f_r = -\frac{Pe}{At} - \frac{Pe.e.Cb}{It} + \frac{M.Cb}{It} \quad (4.15)$$

sehingga persamaan momen retak adalah :

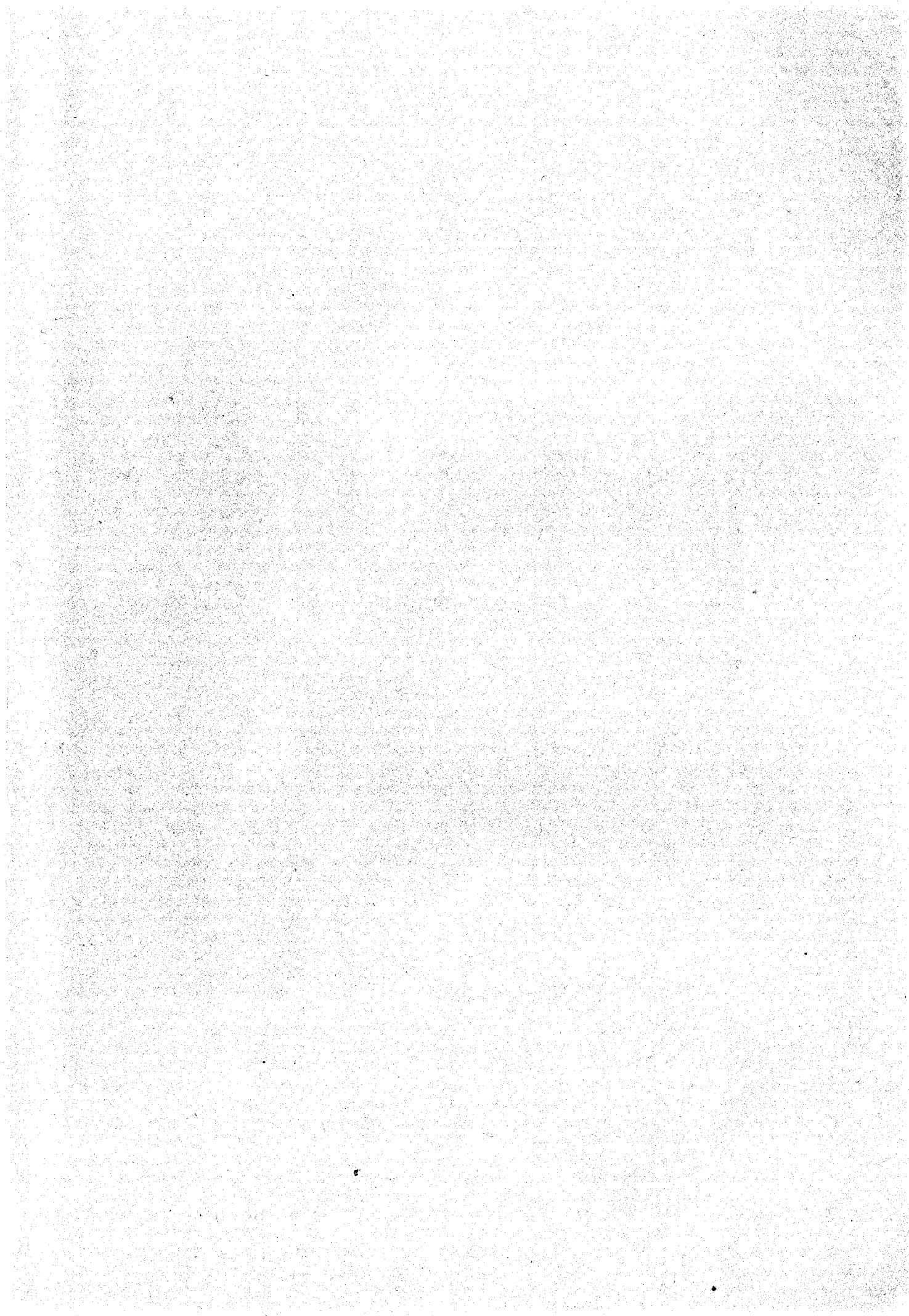
$$\begin{aligned} \frac{Mr.Cb}{It} &= f_r + \frac{Pe}{At} + \frac{Pe.e.Cb}{It} \\ Mr &= \frac{f_r.It}{Cb} + \frac{Pe.It}{At.Cb} \left( 1 + \frac{e.Cb}{r^2} \right) \\ &= \frac{f_r.It}{Cb} + Pe \left( \frac{r^2}{Cb} + e \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Tegangan tarik akibat lentur yang terjadi dalam beton, jika melampaui nilai modulus retaknya akan menghasilkan retak lentur penampang. Dalam kondisi retak beton prategang memerlukan perhatian khusus karena pemakaian baja mutu tinggi lebih sensitif terhadap kondisi lingkungan. Selain hal itu yang lebih penting adalah kemampulayanan struktur akibat retak. Terjadinya retak sedapat mungkin dihindari karena menyangkut kemampulayanan struktur dan harus dilakukan analisis kondisi retak terhadap perilaku struktur yang berkaitan dengan keamanan struktur.

Ada beberapa parameter yang mempengaruhi lebar retak yang terjadi pada penampang elemen struktur, diantaranya :

- Karakteristik permukaan tulangan tarik, termasuk tendon prategang dan batang baja nonprategang.
- Letak baja pada penampang.
- Tebal selimut beton.
- Rasio total luasan baja dengan beton.
- Kenaikan tegangan baja pada penampang batang yang dibebani.
- Kekuatan tarik beton.
- Dimensi dan bentuk batang.

Secara ideal metode yang mengevaluasi retak harus berhubungan dengan pengaruh setiap variabel diatas. Metode yang digunakan dalam mengevaluasi retak sesuai dengan metode kompatibilitas regangan, dan didasarkan pada regangan-regangan yang terjadi pada keadaan baja mengalami luluh dan ultimit. Momen tambahan akan didapatkan dari selisih antara momen pada saat terjadi retak dan momen pada keadaan luluh dan ultimit.

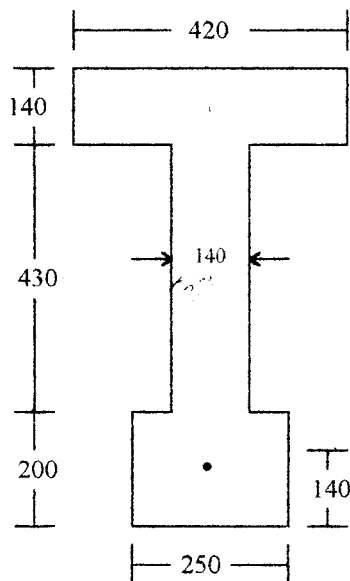


## B A B V

### ANALISIS HITUNGAN

#### 5.1 Tanpa tulangan non-prategang

Diketahui :



- Suatu balok beton prategang mempunyai panjang bentang 16 m. Konstruksi tersebut menggunakan baja prategang dengan 6 strand 7 kawat  $\varnothing 12,7$  mm . Tendon ditarik dengan kekuatan 0,75 fpu setelah kekuatan beton mencapai 75 % tegangan tekan. Pada konstruksi bekerja beban tambahan 7,5 kN/m (dalam perhitungan kehilangan gaya prategang akibat rangkai beton). Kekuatan desak silinder beton umur 28 hari adalah 42 Mpa. Modulus elastis tendon 186000 Mpa Tendon diangkur dengan VSL tipe E5-7, sheat logam fleksibel  $\varnothing 1 \frac{3}{4}$  in , berat jenis beton 25 kN/m.

Pembahasan :

### A. Sifat penampang saat transfer gaya prategang.

Pada saat transfer gaya penampangnya adalah netto

$$n_i = \frac{E_{ps}}{4730\sqrt{f'_c}} = \frac{186000}{4730\sqrt{31,5}} = 7,006$$

| No  | l u a s (mm <sup>2</sup> )                 | y (mm) | A . Y (mm <sup>2</sup> ) |
|-----|--------------------------------------------|--------|--------------------------|
| I   | 420 . 140 = 58800                          | 70     | 4116000                  |
| II  | 140 . 430 = 60200                          | 355    | 21371000                 |
| III | 280 . 200 = 56000                          | 670    | 3752000                  |
| Aps | -6.0,25 . π . 12,7 <sup>2</sup> = -759,676 | 630    | - 478595,817             |
|     | Σ 174240,324                               |        | Σ 62528404               |

$$C_a = \frac{\sum A . Y}{\sum A} = \frac{62528404,18}{174240,324} = 358,863 \text{ mm}$$

$$C_b = 770 - 358,863 = 411,137 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} . 140^3 . 420 + 5880 . (288,863^2) = 500249767$$

$$I_2 = \frac{1}{12} . 430^3 . 140 + 60200 (3,863^2) = 928480017,4$$

$$I_3 = \frac{1}{12} . 200^3 . 280 + 56000 (311,137^2) = 5607815702$$

$$I_4 = - \left( 6 . \frac{1}{64} . \pi . 12,7^4 + 759,676 . (271,137^2) \right) = -55855446,36$$

$$I \text{ total adalah} = 1,1483 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{1,1483 \times 10^{10}}{174240,324} = 65902,425 \text{ mm}^2$$



### B. Saat Layan

Penampang yang dipakai adalah penampang transformasi.

$$n = \frac{E_{ps}}{4730\sqrt{f'_c}} = \frac{186000}{4730\sqrt{42}} = 6,068$$

| NO              | L U A S mm <sup>2</sup> | Y (mm) | A . Y mm <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------------|--------|-----------------------|
| I               | 58800                   | 70     | 4116000               |
| II              | 60200                   | 355    | 21371000              |
| III             | 56000                   | 670    | 37520000              |
| A <sub>ps</sub> | 759,676.6,068 = 4609,71 | 630    | 2904117,3             |
|                 | Σ 179609,71             |        | Σ 65911117,3          |

$$C_a = \frac{\sum A \cdot Y}{\sum A} = 366,968 \text{ mm}$$

$$C_b = 770 - 366,968 = 403,031 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 140^3 \cdot 420 + 58800(296,969^2) = 5281646513$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 430^3 \cdot 140 + 60200(11,969^2) = 936205755,7$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 200^3 \cdot 280 + 56000(303,031) = 5329022736$$

$$I_4 = \frac{1}{64} \cdot 6 \cdot \pi \cdot 12,7^4 \cdot 6,068 + 4609,71(263,031^2) = 318970670,1$$

$$I_{\text{total}} = 1,186 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{1,186 \times 10^{10}}{179609,71} = 66064,61 \text{ mm}^2$$

### C. Eksentrisitas penampang pada saat transfer gaya prategang

$$f_{pj} = 0,75 f_{pu} = 0,75 \cdot 1860 = 1395 \text{ Mpa}$$

$$P_j = A_{ps} \cdot f_{pj} = 759,676 \cdot 1395 = 1059748,02 \text{ N}$$

$$q = 25 \times 10^{-3} \cdot 179609,71 = 4490,243 \text{ N / m}$$

$$M_d = \frac{1}{8} \cdot 4490,243 \cdot 16^2 \cdot 10^3 = 14,367 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$f'_{ci} = 0,75 \cdot 42 = 31,5 \text{ Mpa}$$

$$f_{ti} = 0,25 \sqrt{f'_{ci}} = 0,25 \sqrt{31,5} = 1,403 \text{ Mpa}$$

Agar serat atas tidak rusak maka :

$$f_{ti} \geq -\frac{P_j}{A} + \frac{P_j \cdot e \cdot C_a}{I_c} - \frac{M_o \cdot C_a}{I_c}$$

$$\geq -\frac{1059748,02}{174240,324} + \frac{1059748,02 \cdot e \cdot 358,863}{1,1483 \times 10^{10}} - \frac{14,368 \times 10^7 \cdot 358,863}{1,1483 \times 10^{10}}$$

$$1,403 \geq -6,082 + 0,033 \cdot e - 4,49024$$

$$e \text{ terjadi} \leq 362,95 \text{ mm}$$

$$e \text{ ada} = 411,137 - 140 = 271,137 \text{ mm}$$

$$e \text{ ada} \leq 362,95 \text{ mm}$$

Karena  $e$  yang ada lebih kecil dari  $e$  yang terjadi, maka serat atas tidak retak pada saat transfer gaya prategang.

#### D. Kehilangan Gaya Prategang

1. Akibat deformasi elastis beton tidak diperhitungkan, karena penarikan dilakukan sekali.
2. Akibat gesekan

$$\Delta f_{p_f} = f_{pj}(K \cdot L + \mu \cdot \alpha)$$

$$\alpha = \frac{8 \cdot Y}{x} = \frac{8 \cdot 271,137}{16000} = 0,135 \text{ rad}$$

$$k = 0,002 / \text{m} = 0,002 \cdot 10^{-3} / \text{mm}$$

$$\mu = 0,2$$

$$\Delta f_{p_F} = 1395(0,002 \times 10^{-3} \cdot 16000 + 0,2 \cdot 0,135)$$

$$= 82,305 \text{ Mpa}$$

### 3. Akibat slip angkur

penarikan dilakukan 1 kali, ditentukan dengan test slip 0,1 in (2,54 mm)

$$\Delta f_{p_A} = \frac{\Delta a}{L} \cdot E_p = \frac{2,54}{16000} \cdot 186000 = 29,5275 \text{ Mpa}$$

Cek Kehilangan Gaya Prategang :

Kehilangan gaya prategang pada 0,75  $f_{pu} = 1395 \text{ Mpa}$ , dengan dengan memperhitungkan kehilangan gaya prategang 1, 2, 3 adalah :

$$= 1395 - 82,305 - 29,5275$$

$$= 1283,1675 \text{ Mpa}$$

Pada penarikan 0,7  $f_{pu} = 0,7 \cdot f_{pu} = 1302$  (batas kekuatan tarik tendon maksimal). Jadi pada penarikan 0,75  $f_{pu}$  dengan memperhitungkan kehilangan 1, 2, 3 adalah  $1283,1675 < 1302 \text{ Mpa}$ , maka hal ini memenuhi kriteria dan kehilangan prategang 1, 2, 3 dapat diperhitungkan.

### 4. Akibat rangkai beton

$$\Delta f_{p_{CR}} = n \cdot K_{cr} \cdot (f_{cs} - f_{csd})$$

$K_{cr} = 1,6$  (untuk batang prategang post-tension)

$$P_i = A_{ps} \cdot f_{pi} = 759,676 \cdot 1283,1675 = 974791,554 \text{ N}$$

$$f_{cs} = \frac{P_i}{A_t} + \frac{P_i \cdot e^2}{I_t} - \frac{M_o \cdot e}{I_t}$$

$$= \frac{974791,554}{179609,71} + \frac{974791,554 \cdot 263,031^2}{1,186 \times 10^{10}} - \frac{14,638 \times 10^7 \cdot 263,031}{1,186 \times 10^{10}}$$

$$= 5,427 + 5,686 - 3,186$$

$$= 7,427 \text{ Mpa}$$

$$f_{csd} = \frac{M_{sd.e}}{I_t} = \frac{\frac{1}{8} \cdot 7,516^2 \cdot 263,031 \times 10^6}{1,186 \times 10^7} = 5,3227 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{p_{cr}} &= 6,068 \cdot 1,6 \cdot (7,427 - 5,3227) \\ &= 20,430 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

### 5. Susut beton

$$\begin{aligned} \Delta f_{p_{sh}} &= \epsilon_{sh} \times E_{ps} \\ &= 8,2 \times 10^{-6} \cdot K_{sh} \left( 1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) E_{ps} \end{aligned}$$

$$V = 174240,324 \cdot 16 = 2787845,184 \text{ mm}^3$$

$$S = (420+280+140+(420+140)+2(140+430+200)) \cdot 16 + (174240,324) \cdot 2$$

$$S = 391040,648 \text{ mm}^2$$

$$\frac{V}{S} = \frac{2787845,184}{391040,648} = 7,129 \text{ mm}$$

$$K_{sh} = 0,785(6 \text{ hari})$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{p_{sh}} &= 8,2 \times 10^{-6} \cdot 0,785 (1 - 0,06 - 7,129) (100 - 75) \cdot 186000 \\ &= 13,965 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

### 6. Akibat relaksasi Baja

$$\Delta f_{p_R} = f'_{pi} \left( \frac{\log t_n - \log t}{10} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right)$$

$$f'_{pi} = 0,9 \cdot f_{pi} = 0,9 \cdot 1283,1675 = 1254,85 \text{ Mpa}$$

$$f_{py} = 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1860 = 1581 \text{ Mpa}$$

Dihitung untuk interval 5 tahun pertama  $t_n = 24 \cdot 30 \cdot 12,5 = 43200 \text{ jam}$

$$\Delta f_{rr} = 1168,3674 \left( \frac{\log 143200}{10} \right) \left( \frac{1168,367}{1581} - 0,55 \right) = 141,712 \text{ Mpa}$$

Sehingga total kehilangan gaya prategang adalah :

$$\begin{aligned} f_{pe} &= 1283,1675 - 20,430 - 13,965 - 141,712 \\ &= 1107,061 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Presentase total kehilangan gaya prategang :

$$\text{Total} = \left( \frac{1283,1675 - 1107,061}{1283,1675} \right) \times 100\% = 13,72 \%$$

### E. Penampang Retak

$$P_e = A_{ps} \cdot f_{pe} = 6.0,25 \cdot \pi \cdot 12,7^2 \cdot 1107,061 = 841007,561 \text{ N}$$

$$\epsilon_1 = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} = \frac{1107,061}{186000} = 5,952 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_{cc} = \frac{P_e}{A_t \cdot E_{ps}} \left( 1 + \frac{e^2}{r^2} \right)$$

$$= \frac{841007,561}{179609,71186000} \left( 1 + \frac{263,031^2}{66064,61} \right) = 5,154 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 = 6,004 \times 10^{-3}$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - 0,5 \cdot \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} \right)$$

$$\rho_p = \frac{A_s}{b \cdot d_p} = \frac{759,676}{420 \cdot 630} = 2,871 \times 10^{-3}$$

$$f_{ps} = 1860 \left( 1 - 0,5 \cdot 2,871 \times 10^{-3} \frac{1860}{42} \right)$$

$$= 1741,7558 \text{ Mpa}$$

Tebal flens = 140 mm

$$q = \rho p \frac{f_{ps}}{f'_c} = 2,871 \times 10^{-3} \frac{1741,7558}{42} = 0,1 \leq 0,3$$

Cek letak blok desak untuk kondisi mendekati ultimit :

$$\text{tebal flens} \geq 1,4 \cdot d \cdot \rho p \frac{f_{ps}}{f'_c}$$

$$140 \geq 1,4 \cdot 630 \cdot 2,871 \frac{1741,7558}{42}$$

$$140 \geq 105,012 \text{ mm}$$

Jadi blok desak teletak pada sayap.

### Untuk regangan baja leleh (0,85%)

$$\epsilon_s = 0,85 - 6,004 \times 10^{-3} = 2,496 \times 10^{-3}$$

$$2,496 \times 10^{-3} = \left( \frac{630 - c}{c} \right) \times 0,003$$

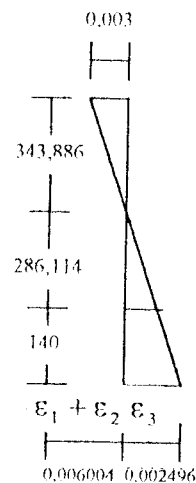
$$2,496 \times 10^{-3} \cdot c = 1,89 - 0,003 \cdot c$$

$$5,496 \times 10^{-3} \cdot c = 1,89$$

$$c = 343,886 \text{ mm}$$

$$a = 0,754 \cdot 343,886 \text{ mm}$$

$$= 259,290 \text{ mm}$$



Gambar 5.1 Diagram regangan saat leleh (0,85%)

$$f_{py} = E_s \cdot \epsilon_s$$

$$= 186000 \cdot 0,85 \%$$

$$= 1581 \text{ Mpa}$$

$$M_n = A_p f_{py} \cdot (d_{ps} - h_f/2) + A_{pw} f_{py} \cdot (d_{ps} - a/2)$$

$$A_{pf} = \frac{0,85 \cdot f'c \cdot (b - b_w) \cdot h_f}{f_{py}}$$

$$= \frac{0,85 \cdot 42 \cdot (420 - 140) \cdot 140}{1581} = 585,1612 \text{ mm}^2$$

$$A_{pw} = 759,676 - 585,1612 = 174,5148 \text{ mm}^2$$

$$M_n = 585,1612 \cdot 1581 (630 - 140/2) + 174,5148 \cdot 1581 (630 - 259,290/2)$$

$$= 65,61302167 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 0,9 M_n = 59,0517195 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

**Untuk Regangan Baja 5,5 % (regangan baja saat ultimate)**

$$\epsilon_3 = 0,055 - 6,004 \times 10^{-3} = 0,0489$$

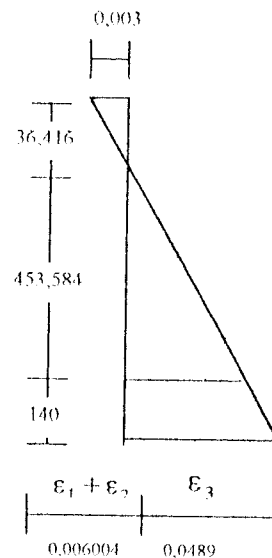
$$0,0489 = \left( \frac{d - c}{c} \right) \times 0,003$$

$$0,0489 = \left( \frac{630 - c}{c} \right) \times 0,003$$

$$0,0489 \cdot c = 1,89 - 0,003 \cdot c$$

$$c = 36,416 \text{ mm}$$

$$a = \beta_1 \cdot c = 0,0754 \cdot 36,416 = 27,457 \text{ mm}$$



Gambar 5.2 Diagram regangan tendon tanpa non-prategang 5,5 %

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} (d - a/2)$$

$$= 759,676 \cdot 1741,7558 (630 - 27,457 / 2)$$

$$= 79,7266869 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 0,9 \cdot M_n = 71,75401821 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

### E. Momen Retak

$$f_r = 0,62 \sqrt{f'_c} = 4,018 \text{ Mpa}$$

$$M_r = \frac{f_r I_t}{C_b} + P e \left( \frac{r^2}{C_b} + e \right)$$

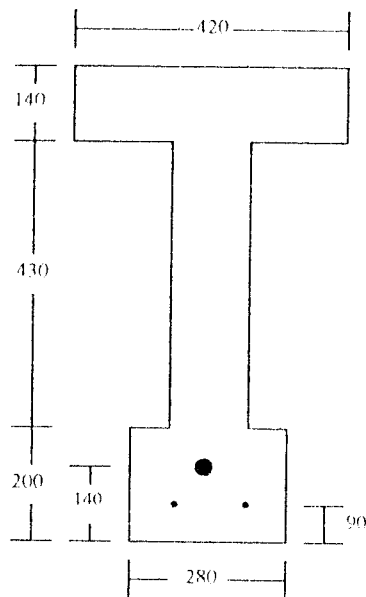
$$= \frac{4,018 \cdot 1,186 \times 10^{10}}{403,031} + 841007,561 \left( \frac{66064,61}{403,03} + 263,031 \right)$$

$$= 47,73066315 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{0,9} = 53,034907017 \text{ Nmm}$$

## 5.2 Dengan tulangan non-prategang

Diketahui :



Suatu balok beton prategang mempunyai panjang bentang 16 m. Balok memikul beban tambahan sebesar 7,5kN/m (dalam perhitungan kehilangan gaya prategang akibat rangkai beton). Balok tersebut bertulangan baja prategang dengan 6 strand 7 kawat  $\varnothing$  12,7 in, dan disertai dengan 2 buah tulangan konvensional  $\varnothing$  20 mm, dengan  $f_y = 275$  Mpa dan  $E_s = 200000$  Mpa. Tendon ditarik dengan kekuatan 0,75 fpu pada beton mencapai 75% tegangan tekan. Kekuatan desak silinder beton umur 28 hari adalah 42 Mpa. Modulus elastis tendon 186000 Mpa. Angkur tipe E5-7, sheat logam fleksibel  $\varnothing$  1 3/4 in, berat jenis beton adalah 25kN/m

Pembahasan :

A. Sifat penampang saat transfer gaya prategang

$$n_i = \frac{E_p}{4730\sqrt{f'_c}} = \frac{186000}{4730\sqrt{31,5}} = 7,006 \quad n_s = \frac{E_s}{4730\sqrt{f'_c}} = \frac{200000}{4730\sqrt{31,5}} = 7,5338$$

| NO  | L U A S (mm <sup>2</sup> )                  | Y (mm) | A . Y (mm <sup>3</sup> ) |
|-----|---------------------------------------------|--------|--------------------------|
| I   | 420.140 = 58800                             | 70     | 4116000                  |
| II  | 140.430 = 60200                             | 355    | 21371000                 |
| III | 280.200 = 56000                             | 670    | 37520000                 |
| IV  | -6.0,25.π.12,7 <sup>2</sup> = - 759,676     | 630    | -478595,817              |
| V   | 2.0,25.π.20 <sup>2</sup> . 7,534 = 4731,352 | 680    | 3217319,36               |
|     | Σ 178971,676                                |        | Σ 65745723,48            |

$$C_a = \frac{\sum A \cdot Y}{\sum A} = 367,353 \text{ mm}$$

$$C_b = 770 - 367,353 = 402,647 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 420 \cdot 140^3 + 58000(297,353)^2 = 5224330783 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 140 \cdot 430^3 + 60200(12,353)^2 = 93676798,25 \text{ mm}^4$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 280 \cdot 200^3 + 56000(302,647)^2 = 5315998237 \text{ mm}^4$$

$$I_4 = \frac{1}{64} \cdot 6 \cdot \pi \cdot 12,7^4 + 759,676(262,647)^2 = -52412726,79 \text{ mm}^4$$

$$I_5 = \frac{1}{64} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 20^4 \cdot 7,534 + 473,352(311,647) = 462594214,5 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{total}} = 1,104 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{1,104 \times 10^{10}}{178971,676} = 61685,738 \text{ mm}^2$$

## B. Saat Layan

Sifat Penampang Pada Saat Layan (tampang transformasi)

$$n_p = \frac{E_{ps}}{4730\sqrt{f'c}} = \frac{186000}{4730\sqrt{42}} = 6,068$$

$$n_s = \frac{E_s}{4730\sqrt{f'c}} = \frac{200000}{4730\sqrt{42}} = 5,524$$

| NO  | L U A S<br>(mm <sup>2</sup> ) | Y (mm) | A . Y (mm <sup>3</sup> ) |
|-----|-------------------------------|--------|--------------------------|
| I   | 58800                         | 70     | 4116000                  |
| II  | 60200                         | 355    | 21371000                 |
| III | 56000                         | 670    | 37520000                 |
| IV  | 759,676.6,068 = 4609,710      | 630    | 2904117,3                |
| V   | 628.5,524 = 4097,072          | 680    | 2786008,96               |
|     | $\Sigma$ 183706,782           |        | $\Sigma$ 68697126,26     |

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 420 \cdot 140^3 + 58800(303,45)^2 = 5528313427$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 140 \cdot 430^3 + 60200(18,95)^2 = 949199637,2$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \cdot 280 \cdot 200^3 + 56000(296,05)^2 = 5094820407$$

$$I_4 = \frac{1}{64} \cdot 6 \cdot \pi \cdot 12,7^4 \cdot 6,068 + 4609,710(256,05)^2 = 302266443,5$$

$$I_5 = \frac{1}{64} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 20^4 \cdot 6,524 + 4097,072(306,05)^2 = 383861241,2$$

$$I \text{ total} = 1,226 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$C_a = \frac{\sum A \cdot Y}{\sum Y} = \frac{1,226 \times 10^{10}}{183706,782} = 373,950 \text{ mm}$$

$$C_b = 770 - 373,950 = 396,050 \text{ mm}$$

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{1,226 \times 10^{10}}{183706,782} = 66736,785 \text{ mm}^2$$

### C. Eksentrisitas Penampang

$$f_{pj} = 0,75 \cdot f_{pu} = 0,75 \cdot 1860 = 1395 \text{ Mpa}$$

$$P_i = A_{ps} \cdot f_{pi} = 759,676 \cdot 1395 = 1059748,02 \text{ N}$$

$$q = 25 \times 10^{-3} \cdot 183706,782 = 4592,669 \text{ N/m}$$

$$M_d = \frac{1}{8} \cdot 4592,669 \cdot 16^2 \times 10^{-3} = 14,688 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$f'_{ci} = 0,75 \cdot 42 = 31,5 \text{ Mpa}$$

$$f_{ti} = 0,25 \sqrt{f'_{ci}} = 1,403 \text{ Mpa}$$

Agar serat atas tidak rusak maka :

$$f_{ti} \geq -\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e \cdot C_a}{I_c} - \frac{M_o \cdot C_a}{I_c}$$

$$\geq -\frac{1059748,02}{178971,676} + \frac{1059748,02 \cdot e \cdot 367,353}{1,1044 \times 10^{10}} - \frac{14,688 \cdot 367,353 \times 10^7}{1,1044 \times 10^7}$$

$$1,403 \geq -5,931 + 0,03525 \cdot e - 4,8856$$

$$346,655 \geq e$$

$$e_{\text{ada}} = 402,647 - 140 = 262,647 \text{ mm}$$

Kehilangan gaya prategang sebelum diangkur ( pada saat penarikan )

1. Kehilangan tegangan akibat slip pengangkuran

Penarikan dilakukan 1 kali, ditentukan dengan test slip 0,1 in (2,54 mm)

$$\Delta f_{p_A} = \frac{\Delta A}{L} \cdot E_p = \frac{2,54}{16000} \cdot 186000 = 29,5275 \text{ Mpa}$$

2. Kehilangan akibat perpendekan elastis beton

Kehilangan akibat perpendekan elastis beton tidak diperhitungkan karena penarikan tendon hanya dilakukan sekali saja.

3. Kehilangan tegangan akibat gesekan

$$\Delta f_{p_F} = f_{pj}(K \cdot L + \mu \cdot \lambda)$$

$$\alpha = \frac{8 \cdot y}{x} = \frac{8 \cdot 263,288}{16000} = 0,132 \text{ radian}$$

$$k = 0,002 / \text{m} = 0,002 \times 10^{-3} / \text{m}$$

$$\mu = 0,2$$

$$f_{p_F} = 1395(0,002 \times 10^{-3} \cdot 16000 + 0,2 \cdot 0,132)$$

$$= 81,468 \text{ Mpa}$$

$$f_{pi} = f_{py} - \Delta f_{p_A} - \Delta f_{p_{ES}} - \Delta f_{p_F}$$

$$= 1395 - 29,5275 - 81,468$$

$$= 1284,0045 < 1302 \text{ Mpa}$$

$$P_i = f_{pi} \cdot A_{ps} = 1284,0045 \cdot 759,676$$

$$= 975427,4025 \text{ N}$$

#### 4. Kehilangan tegangan akibat rangkai beton

$$\Delta f_{p_{CR}} = n \cdot K_{cr} \cdot (f_{cs} - f_{csd})$$

$$K_{cr} = 1,6 \text{ (post-tension)}$$

$$f_{cs} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e^2}{I_t} - \frac{M_o \cdot e}{I_t}$$

$$= \frac{975427,4025}{183706,072} + \frac{975427,4025 \cdot 256,05^2}{1,226 \times 10^{10}} - \frac{14,688 \times 10^7 \cdot 256,05}{1,226 \times 10^{10}}$$

$$= 5,30971 + 5,2162 - 3,067$$

$$= 7,4589 \text{ Mpa}$$

$$f_{csd} = \frac{M_{ps} \cdot e}{I_t} = \frac{7,516^2 \times 10^6 \cdot 256,05}{8,1226 \times 10^{10}} = 5,012 \text{ Mpa}$$

$$\Delta f_{p_{CR}} = 6,068 \cdot 1,6 \cdot (7,4589 - 5,012) = 23,756 \text{ Mpa}$$

#### 5. Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja

$$\Delta f_{p_R} = f'_{pi} \left( \frac{\log t_n}{10} \right) \left( \frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right)$$

$$f'_{pi} = 0,9 \cdot f_{pi} = 0,9 \cdot 1284,0045 = 1155,604 \text{ Mpa}$$

$$f_{py} = 0,85 \cdot 1860 = 1582 \text{ Mpa}$$

$$t_n = 43200 \text{ jam}$$

$$\Delta f_{p_R} = 1155,604 \left( \frac{\log 43200}{10} \right) \left( \frac{1155,604}{1581} - 0,55 \right)$$

$$= 96,9215 \text{ Mpa}$$

6. Kehilangan tegangan akibat susut beton

$$\Delta f_{p_S} = 13,965 \text{ Mpa}$$

$$\text{Tegangan efektif } f_{pe} = 1284,0045 - 23,756 - 96,4215 - 13,465$$

$$= 1149,362 \text{ Mpa}$$

Presentase kehilangan prategang :

$$= \left( \frac{1284,0045 - 1149,362}{1284,0045} \right) \times 100\% = 10,486\%$$

#### D. Penampang Retak

$$P_e = A_{ps} \cdot f_{pe} = 759,676 \cdot 1149,362 = 873142,7261 \text{ N}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} = \frac{1149,362}{186000} = 0,006179$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{cu} = \frac{P_e}{A_t \cdot E_{ps}} \left( 1 + \frac{e^2}{r^2} \right)$$

$$= \frac{873142,7267}{183706,782 \cdot 186000} \left( 1 + \frac{256,05^2}{66736,785} \right)$$

$$= 5,065 \times 10^{-5}$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0,006179 + 0,00005065$$

$$= 0,006229$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left( \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} \right) (\omega - \omega') \right)$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p} = \frac{759,676}{420 \cdot 630} = 0,00287$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{2,0,25 \cdot \pi \cdot 20^2}{420 \cdot 680} = 2,198 \cdot 10^{-3}$$

$$\omega = \rho \frac{f_y}{f'_c} = 2,198 \times 10^{-3} \cdot \frac{275}{42} = 0,0144$$

$$f_y = 275 \text{ Mpa}$$

$$\Rightarrow \frac{f_{py}}{f_{pu}} = \frac{1581}{1860} = 0,85 \quad \gamma_p = 0,4$$

$$\begin{aligned} f_{ps} &= 1860 \left( 1 - \frac{0,4}{0,754} \left( 0,00287 \cdot \frac{1860}{42} + \frac{680}{630} (0,0144 - 0) \right) \right) \\ &= 1719,248 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Cek letak blok desak pada kondisi mendekati ultimit

Tebal flens 140 mm

$$140 > 1,4 \cdot d_p \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{ps}}{f'_c}$$

$$> 1,4 \cdot 630 \cdot 0,00287 \cdot \frac{1719}{42}$$

$$> 103,619 \quad (\text{blok desak jatuh pada sayap})$$

$$q = \rho_p \cdot \frac{f_{ps}}{f'_c} + (\rho - \rho') \cdot \frac{f_y}{f'_c}$$

$$= 0,00287 \cdot \frac{1719,248}{42} + (2,198 \times 10^{-3} - 0) \cdot \frac{275}{42}$$

$$= 0,1318 \leq 0,3$$

### Untuk regangan baja saat leleh (0,85%)

$$\epsilon_3 = 0,85 - 6,229 \times 10^{-3} = 2,271 \times 10^{-3}$$

$$2,271 \times 10^{-3} = \left( \frac{630 - c}{c} \right) \times 0,003$$

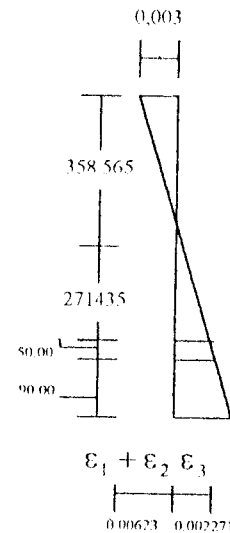
$$2,271 \times 10^{-3} \cdot c = 1,89 - 0,003 \cdot c$$

$$5,271 \times 10^{-3} \cdot c = 1,89$$

$$c = 358,565 \text{ mm}$$

$$a = 0,754 \cdot 358,565$$

$$= 270,358 \text{ mm}$$



Gambar 5.3 Diagram regangan saat leleh (0,85%)

$$A_{pf} = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot (b - b_w) \cdot h_f}{f_{py}} = \frac{0,85 \cdot 42 \cdot (420 - 140) \cdot 140}{1581} = 585,1612 \text{ mm}^2$$

$$A_{pw} = 759,676 - 585,1612 = 174,5148 \text{ mm}^2$$

$$d = \frac{A_{ps} \cdot f_{py} \cdot d_{ps} + A_s \cdot f_y \cdot d_s}{A_{ps} \cdot f_{py} + A_s \cdot f_y}$$

$$d = \frac{759,676 \cdot 1581 \cdot 630 + 628,275 \cdot 680}{759,676 \cdot 1581 + 628,275} = 636,286$$

$$M_n = A_{pw} \cdot f_{py} (d - a/2) + A_{pf} \cdot f_{py} (d - h_f/2)$$

$$= 174,5148 \cdot 1581 (636,286 - 270,358/2) + 1581 \cdot 585,1612 (636,286 - 140/2)$$

$$= 74,2153128 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 0,9 \cdot M_n = 66,7937815 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

### E. Momen Retak

$$I_s = \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot 20^4 \cdot 2 + \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 20^2 \cdot 2 \cdot 306,05^2$$

$$= 15700 + 58822626,37$$

$$= 58838326,37 \text{ mm}^4$$

$$f_r = 0,62 \cdot \sqrt{f'_c} = 0,62 \cdot 42 = 4,018 \text{ Mpa}$$

$$M_r = \frac{f_r \cdot I_t}{C_b} + P e \left( \frac{r^2}{C_b} + e \right) + \frac{f_y \cdot I_s}{C_b}$$

$$= \frac{4,018 \cdot 1,226 \times 10^{10}}{396,050} + 873142,7267 \left( \frac{66736,785}{396,050} + 256,050 \right) + \frac{275 \cdot 58838326,37}{396,050}$$

$$= 53,5932690 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 59,54807667 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Untuk regangan baja 5,5 % (regangan baja saat ultimite)

$$\epsilon_3 = 0,055 - \epsilon_1 + \epsilon_2$$

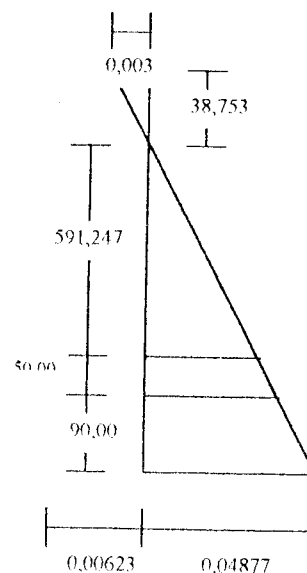
$$\epsilon_3 = 0,055 - 0,00623$$

$$\epsilon_3 = 0,04887$$

$$\epsilon_3 = \frac{d - c}{c} \cdot 0,003$$

$$0,04877 = \frac{630 - c}{c} \cdot 0,003$$

$$0,04877 \cdot c = 1,89 - 0,003 \cdot c$$



Gambar 5.4 Diagram regangan tendon dengan non-prategang 5,5 %

$$c = 38,7533 \text{ mm} \quad a = \beta_1 \cdot c \quad \beta_1 = 0,754$$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$a = 0,754 \cdot 38,7553 = 29,2200 \text{ mm}$$

Momen yang terjadi pada saat terjadi regangan baja 5,5 % :

$$\begin{aligned} M_n &= A_{ps} \cdot f_{ps} (d_{ps} - a/2) + A_s \cdot f_y (d_s - a/2) \\ &= 759,676 \cdot 1719,248 (630 - 29,22/2) + 628 \cdot 275 (680 - 29,22/2) \\ &= 91,86561587 \times 10^7 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_u &= 0,9 \cdot M_n \\ &= 0,9 \cdot 91,86561587 \times 10^7 \text{ Nmm} \\ &= 82,67905428 \times 10^7 \text{ Nmm} \end{aligned}$$



## **BAB VI**

### **PEMBAHASAN**

#### **6.1 Hasil Analisis Hitungan**

Beberapa hal dapat diperoleh dari perhitungan analisa tampang elemen balok prategang pascatarik dengan tendon terekat, dalam hal ini mengenai kapasitas tampang elemen struktur terhadap kekuatan lentur. Kapasitas tampang elemen struktur dapat diketahui secara pasti, sehingga meyakinkan akan ketepatan hasil rancangan. Hal tersebut bisa dijadikan referensi dalam desain struktur terhadap kekuatan lentur yang serupa, dengan demikian dalam perencanaan selanjutnya bisa mendapatkan hasil yang diharapkan dengan tampang yang ekonomis.

Dalam analisis kapasitas tampang terhadap kekuatan lentur ini, dapat diketahui besarnya tegangan dan regangan yang terjadi pada tahap-tahap tertentu, misalnya pada tahap penarikan (*transfer*) dan dekompresi, saat leleh, dan saat ultimit. Kekuatan lentur suatu elemen struktur prategang tergantung dari beberapa parameter, diantaranya banyaknya tulangan, baik tulangan prategang maupun non-prategang, karakteristik dan kekuatan bahan, dimensi tampang, kekuatan penarikan tendon, dan kehilangan gaya prategang yang akan mereduksi kekuatan gaya penarikan.

Dalam analisis ini kehilangan gaya prategang diperhitungkan dalam dua tahap, yaitu tahap segera setelah transfer gaya prategang dan setelah beban layan. Dalam tahap segera setelah transfer gaya prategang, kehilangan gaya

prategang terjadi pada saat penarikan dan segera setelah penarikan. Kehilangan gaya prategang itu ialah akibat gesekan (*friction*), slip ankur, dan deformasi elastis beton. Pada tahap tersebut tegangan tendon harus lebih kecil daripada tegangan tendon yang diijinkan setelah transfer gaya prategang, sebesar 0,7 fpu. Pada saat beban layan tegangan tendon berangsur-angsur berkurang akibat susut dan rangkai beton serta relaksasi baja. Setelah memperhitungkan semua kehilangan gaya prategang pada kedua tahap diatas, maka tegangan tendon akan menjadi tegangan efektif (fpe).

Dalam memperhitungkan kapasitas tampang, dilakukan analisis pada beberapa kondisi, yaitu saat terjadi tegangan leleh pada tendon, saat tegangan ultimit pada tendon, dan saat retak. Pada kondisi ini pertambahan regangan baja dan beton pada posisi baja akan sama sampai beton pada posisi baja sudah tidak mampu lagi meregang, hal ini disebabkan karena adanya rekatan antara kedua bahan tersebut. Terjadinya retak merupakan hal yang sulit diprediksi lebar, banyak dan letaknya, oleh karena itu terjadinya retak sangat bervariasi tergantung beban dan kondisi beton.

Tabel 6-1 Regangan pada Tendon dan Kapasitas Momen Ultimize

| KETERANGAN    | TANPA TULANGAN<br>NON PRATEGANG | DENGAN TULANGAN<br>NON PRATEGANG |
|---------------|---------------------------------|----------------------------------|
|               | MOMEN ULTIMITE<br>( $10^7$ Nmm) | MOMEN ULTIMITE<br>( $10^7$ Nmm)  |
| SAAT RETAK    | 47,7306631                      | 53,5932690                       |
| SAAT LELEH    | 59,0517195                      | 66,5937815                       |
| REGANGAN 5,5% | 71,7540182                      | 82,6790642                       |

## 6.2 Momen Tambahan

Pada saat terjadi retak, momen yang bisa ditahan masih dibawah momen pada keadaan leleh, maka tegangan tendon pada saat retak juga belum mencapai tegangan leleh. Dengan memperhitungkan momen yang terjadi pada struktur balok pada beberapa keadaan, maka akan didapatkan selisih besarnya kapasitas momen yang terjadi pada kedua kondisi tersebut. Besarnya momen tambahan adalah sebagai berikut ini.

### 1. Balok tanpa tulangan non-prategang

#### a. Pada saat leleh (0,85%)

$$\begin{aligned} M_{\text{tambahan}} &= M_{\text{I.L.}} - M_{\text{CR}} \\ &= 590517195 - 477306631 \\ &= 113210564 \text{ Nmm.} \end{aligned}$$

Prosentase kenaikan kapasitas tampang = 19,17 %

#### b. Pada saat regangan 5,5%

$$\begin{aligned} M_{\text{tambahan}} &= M_{5,5\%} - M_{\text{CR}} \\ &= 717540182 - 477306631 \\ &= 240233551 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Prosentase kenaikan kapasitas tampang = 33,48 %

### 2. Balok dengan tulangan non-prategang

#### a. Pada saat leleh (0,85%)

$$\begin{aligned} M_{\text{tambahan}} &= M_{\text{I.L.}} - M_{\text{CR}} \\ &= 665937815 - 535932590 \\ &= 130005225 \text{ Nmm.} \end{aligned}$$

Prosentase kenaikan kapasitas tampang = 19,52 %

#### b. Pada saat regangan 5.5%

$$M_{\text{tambahan}} = M_{5,5\%} - M_{\text{CR}}$$

$$= 826790642 - 535932690$$

$$= 290857952 \text{ Nmm}$$

$$\text{Prosentase kenaikan kapasitas tampang} = 35,17 \%$$

Perbandingan besarnya kapasitas tampang antara balok prategang tanpa tulangan non-prategang dan dengan tulangan non-prategang pada beberapa kondisi adalah sebagai berikut :

1. Pada saat retak

$$\text{Selisih kapasitas tampang} = 535932690 - 477306631$$

$$= 58626060 \text{ Nmm}$$

$$\text{Prosentase kenaikan kapasitas tampang} = 10,939 \%$$

2. Pada saat leleh (0,85%)

$$\text{Selisih kapasitas tampang} = 665937815 - 590517195$$

$$= 75420620 \text{ Nmm}$$

$$\text{Prosentase kenaikan kapasitas tampang} = 11,32 \%$$

3 . Pada saat regangan 5,5 %

$$\text{Selisih kapasitas tampang} = 826790642 - 717540182$$

$$= 109250460 \text{ Nmm}$$

$$\text{Prosentase kenaikan kapasitas tampang} = 13,213 \%$$

Pada analisis ini, prosentase kenaikan kapasitas tampang dengan penggunaan tulangan non-prategang meningkat sampai mendekati keadaan ultimit. Keuntungan penggunaan tulangan non-prategang tersebut, makin meningkat bila keadaan semakin mendekati keadaan ultimit.



## **BAB VII**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **7.1. Kesimpulan**

Dari uraian dan pembahasan tentang kapasitas balok prategang pascatarik, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Pemakaian tulangan non-prategang akan semakin efektif bila mendekati keadaan ultimit, dan dapat mereduksi lebar retak yang ditimbulkan.
2. Dari hasil analisa hitungan kapasitas momen yang masih dapat ditahan dari saat retak sampai keadaan ultimit sebesar 33,48 % (tanpa tulangan non-prategang), dan 35,17 % (dengan tulangan non-prategang).

#### **7.2 Saran**

Untuk melaksanakan studi lebih lanjut tentang beton prategang, beberapa hal yang perlu dipertimbangkan antara lain sebagai berikut ini.

1. Karena sulit untuk memprediksi letak dan banyaknya retak, maka perlu adanya pendekatan yang lebih mendekati kondisi sebenarnya dengan melakukan percobaan.
2. Penarikan tendon yang optimum harus diperhitungkan untuk menghasilkan kapasitas yang maksimum dengan memperhitungkan kekuatan bahan dan kehilangan gaya prategang.
3. Mempelajari perilaku tegangan pada daerah ujung balok, tegangan geser, dan puntir, sehingga didapatkan struktur yang ekonomis dan mempunyai kemampuan tinggi.

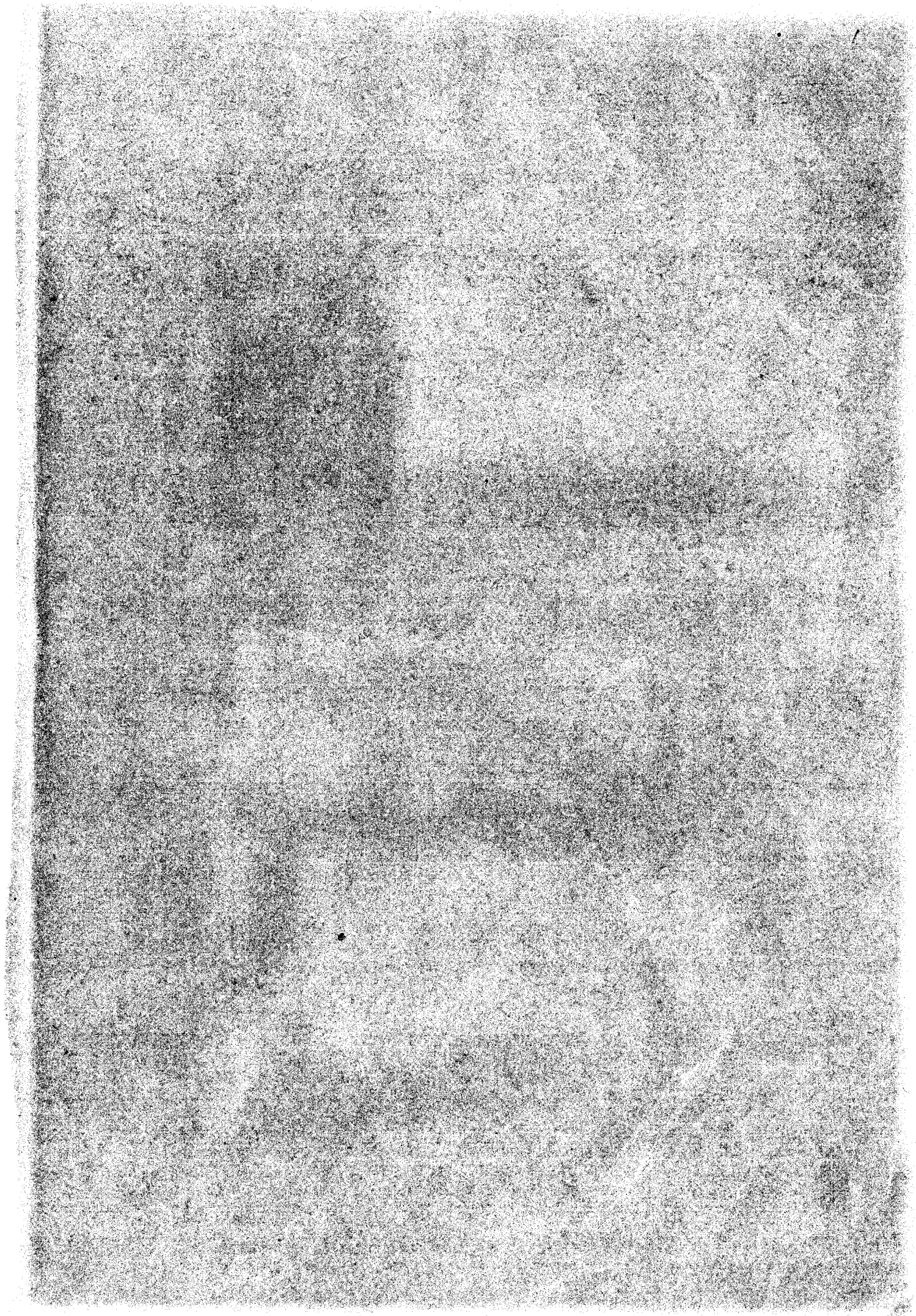
## **PENUTUP**

Alhamdulillahirrabil'alamin,

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Allah swt yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada kami hingga terselesainya Laporan Tugas Akhir ini.

Dalam Laporan Tugas Akhir ini, kami berusaha sebaik-baiknya menyampaikan permasalahan dari hasil study pustaka tentang Kapasitas Lentur Balok Beton Prategang Post-tension dengan Grouting pada Pasca retak. Mengingat keterbatasannya pengetahuan kami dan literatur yang mendukung, kami menyadari masih banyak kekurangan dan kesalahan. Untuk itu kami mengharapkan saran demi kesempurnaan Laporan Tugas Akhir ini.

Kami mengharapkan agar Laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan sesuatu yang bermanfaat bagi semua pihak yang mempelajarinya.



## DAFTAR PUSTAKA

- a. Arthur H Nilson, George Winter, "*Design of Prestressed Concrete*" John Wiley and son Inc, 2<sup>nd</sup> ed, New York, 1987 .
- b. Antonie E. Naaman, "*Prestrssed Concerte Analysis ada Design*" McGraw-Hill Inc, New York, 1982.
- c. Istimawan Dipohusodo, "*Struktur Beton Bertulang*", PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1994.
- d. Lin, T.Y, Burn, Ned H, "*Desain Struktur Beton Prategang*", Erlangga Edisi ketiga, Jakarta, 1982.
- e. Libby, James R, "*Modern Prestessed Concrete*", Van Nostrand reinhold Ltd, 2rd ed San Diego, California, 1977.
- f. N Krishna Raju, "*Beton prategang*", Erlangga, Edisi kedua, Jakarta, 1989.
- g. Phil M Ferguson, "*Dasar-dasar Beton Bertulang*".
- h. Winarni Hadipratomo, "*Struktur beton prategang*".